

ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРЕНАЖЕРЫ
ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ



ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРЕНАЖЕРЫ

ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ
И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ





«МАШИНОСТРОЕНИЕ»



**ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРЕНАЖЕРЫ
ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРЕНАЖЕРЫ

ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ
И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Под редакцией д-ра техн. наук,
проф., засл. деятеля науки
и техники РФ
В.Е. ШУКШУНОВА*



МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2005

УДК 629.7.06
ББК 39.56
Т66

Коллектив авторов:
**В.Е. Шукшунов, В.В. Циблев, С.И. Потоцкий, Г.В. Безруков,
А.Г. Душенко, Е.И. Жук, Н.Е. Зубов, А.М. Макаров,
Б.А. Наумов, В.В. Фоменко**

Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации / В.Е. Шукшунов, В.В. Циблев, С.И. Потоцкий и др. Под ред. В.Е. Шукшунова. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.: ил. и цветная вкладка 16 с.
ISBN 5-217-03312-6

Рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с разработкой и эксплуатацией тренажерных комплексов и тренажеров: принципы и технология проектирования и создания, структура и взаимодействие их основных систем; методическое обеспечение подготовки операторов; создание и эффективность применения.

В основу подхода к проектированию и созданию тренажерных комплексов и тренажеров положены принципы унификации и модульности средств тренажерной техники, методы их коллективного использования и непрерывного развития. Разработаны основы применения технологий виртуальной реальности для создания средств предтренинговой подготовки операторов.

Для специалистов, связанных с научными исследованиями, разработкой, проектированием и эксплуатацией тренажерных комплексов, тренажеров и других средств подготовки операторов к управлению сложными объектами. Также будет полезна преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений, специалистам центров подготовки персонала.

УДК 629.7.06
ББК 39.56

V.E. Shukshunov, V.V. Tsipliev, S.I. Pototskiy et al.

Training facilities and complexes. Technology of development and operating experience.
Moscow: Mashinostroenie, 2005. 384 p.

Wide range of problems, which are concerned with development, maintenance and operating of training complexes and simulators, is under consideration in the book. The following issues are covered: principles and technology for design and constructing of training facilities; typical training simulation systems and interconnections between them; methods of training and efficiency of use.

The approach to constructing of training facilities is discussed, when simulators are designed being parts of a training complex. Basic principles of the approach involve unification of structure of simulators and their components, and creating of the common infrastructure of the training complex, containing technical means that are intended to be used collectively by different simulators. Continuous development and growth of such complexes are implied. Facilities for preliminary training of operators are also discussed that benefit from utilizing of the methods of the virtual reality.

The book is addressed to experts who are engaged in research, design, development, maintenance and exploitation of training facilities. It may be interested for teachers and students specialized in simulation and modeling too.

ISBN 5-217-03312-6

© Шукшунов В.Е., 2005
© Издательство «Машиностроение», 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	11
Раздел I. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ	14
Глава 1. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ТРЕНАЖЕРНОЙ ТЕХНИКЕ	14
1.1. Роль и место тренажерных комплексов и тренажеров в система профессиональной подготовки операторов	14
1.2. Особенности решения многофункциональных задач подготовки операторов на базе тренажерных комплексов и тренажеров на примере подготовки космонавтов к космическому полету	16
1.3. Недостатки использования автономных тренажеров для решения многофункциональных задач подготовки операторов	18
1.4. Интеллектуальные тренажерные комплексы как эффективное средство решения многофункциональных задач подготовки операторов	21
1.5. Классификация тренажеров для профессиональной подготовки операторов	29
Глава 2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ	35
2.1. Тренажер как моделирующий комплекс и обучающая система	35
2.2. Модели реального объекта и среды деятельности операторов в составе тренажера	42
2.3. Моделирование бортовых вычислительных систем	55
2.4. Типовая структура тренажера	57
2.5. Организация проектирования тренажеров	63
Глава 3. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ В ИХ СОСТАВЕ	68
3.1. Унификация и модульность – основа создания современных тренажерных комплексов и тренажеров	68
3.2. Типовая структура тренажерного комплекса	72
3.3. Технология создания тренажерных комплексов и тренажеров в их составе	74
3.4. Обоснование структуры и параметров программных средств тренажерных комплексов	78
3.5. Эффективность создания тренажеров на базе тренажерного комплекса	82
Глава 4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРЕНАЖЕРОВ И ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ	86
4.1. Основные показатели качества тренажерных комплексов и тренажеров	86
4.2. Показатели адекватности условий деятельности операторов на тренажерах и реальных объектах	89
4.3. Методы оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах	90
4.3.1. Базовый метод оценки адекватности моделирования	90
4.3.2. Оценка адекватности имитационного моделирования с привлечением экспертов	109
4.3.3. Оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах "глазами обучаемых"	111

Раздел II. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ	118
Глава 5. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ	118
5.1. Роль и место методического обеспечения решения многофункциональных задач	118
5.2. Принципы планирования подготовки операторов	121
5.3. Автоматизация контроля и управления процессом подготовки операторов на тренажерных комплексах и тренажерах	124
5.4. Принципы оценки эффективности подготовки операторов	125
Глава 6. ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ НА ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ И ТРЕНАЖЕРАХ	129
6.1. Методы контроля и оценки деятельности операторов на тренажерных комплексах и тренажерах	129
6.2. Структура автоматизированной системы оценки операторской деятельности	133
6.3. Автоматизация обучения и оценки качества управления непрерывными процессами на основе концепции оптимального электронного инструктора	135
6.4. Система психофизического контроля состояния операторов	139
6.5. Запись и воспроизведение процесса тренировки	145
Глава 7. ЭЛЕКТРОННЫЙ ИНСТРУКТОР ДЛЯ ОТРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПИЛОТИРУЕМЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ	148
7.1. Особенности построения ОЭИ для отработки операции оптимального управления сближением пилотируемых космических аппаратов	148
7.2. Релейно-импульсное управление пилотируемым космическим аппаратом при наложении ограничений на параметры сближения	154
7.3. Оптимизация управления сближением ПКА вдоль бинормали к опорной орбите по критерию минимума расхода топлива	161
7.4. Релейно-импульсный алгоритм управления операцией облета ПКА в плоскости орбиты	167
7.5. Отработка задачи оптимального сближения ПКА при совмещении непрерывного и релейно-импульсного управления	175
Раздел III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ	182
Глава 8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА И ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	182
8.1. Общие принципы организации процессов обработки информации в тренажерном комплексе	182
8.2. Архитектура вычислительной системы тренажерного комплекса	184
8.3. Тренажерная распределенная исполнительная оболочка ТРИО	190
8.3.1. Исполнительная оболочка ТРИО	191
8.3.2. Технологическое программное обеспечение ТРИО	195

Глава 9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СОПРЯЖЕНИЯ С ОБЪЕКТОМ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ	219
9.1. Назначение и принципы построения	219
9.2. Анализ бортового оборудования реального объекта в части сопряжения с вычислительной системой	219
9.3. Обзор известных и наиболее распространенных магистрально-модульных микропроцессорных технологий УСО	203
9.4. УСО в стандарте VME	207
9.5. Обзор стандартного программного обеспечения УСО	211
9.6. Инструментальные системы	215
Глава 10. СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКИ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ	220
10.1. Задачи операторов, решаемые с использованием визуальной информации	220
10.2. Особенности структуры СИВО в автономных тренажерах и тренажерных комплексах	224
10.3. Технические и программные средства имитации визуальной обстановки	229
10.4. Учет физиологических особенностей зрительного анализатора при построении СИВО	236
Глава 11. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ В ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ	241
11.1. Имитация акустических, акселерационных и тактильных ощущений в тренажерах	241
11.2. Моделирование акустических шумов	242
11.3. Моделирование акселерационных ощущений	246
11.4. Методы имитации невесомости	252
Глава 12. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИРОВКАМИ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ	263
12.1. Функциональная структура и режимы работы системы управления тренировками	263
12.2. Аппаратные и программные средства СУТ	266
12.3. Организация проведения тренировки на базе средств тренажерного комплекса	270
Раздел IV. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ	276
Глава 13. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ПРЕДТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ	276
13.1. Особенности применения компьютерных тренажеров в системах подготовки операторов	276
13.2. Принципы построения компьютерного комплекса на базе технологий виртуальной реальности	279
13.3. Структура компьютерного комплекса для предтренажной подготовки операторов	286
13.4. Инструментальные средства для повышения эффективности проектирования компьютерных комплексов виртуальной реальности	291

Глава 14.	ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРЕДТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ	297
14.1.	Порядок создания, модернизации и использования компьютерного комплекса	297
14.2.	Структура компьютерного комплекса для предтренажной подготовки космонавтов и организация его функционирования	299
14.3.	Моделирование объектов виртуальной среды в компьютерном комплексе для предтренажной подготовки космонавтов	304
Глава 15.	ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХ ПОКОЛЕНИЙ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ	311
15.1.	Тренажерный комплекс для подготовки космонавтов по программе долговременных орбитальных станций "Салют"	311
15.2.	Тренажерный комплекс для подготовки космонавтов по программе ОК "Мир"	317
15.3.	Тренажерный комплекс для подготовки космонавтов по программе Международной Космической Станции	327
15.4.	Итоги построения и использования трех поколений тренажерных комплексов для подготовки космонавтов	332
Глава 16.	ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО И БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ТРАНСПОРТНОГО КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ "СОЮЗ-ТМА"	335
16.1.	Необходимость использования на борту орбитальной МКС бортового компьютерного тренажера транспортного корабля "Союз-ТМА"	335
16.2.	Особенности выполнения программы полета экипажем транспортного корабля "Союз-ТМА"	336
16.3.	Принципы построения действующего бортового компьютерного тренажера транспортного корабля "Союз-ТМА"	341
16.4.	Программное обеспечение бортового компьютерного тренажера	344
Глава 17.	ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ СОЗДАНИИ СРЕДСТВ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	355
17.1.	Комплекс средств обучения и тренировки летчиков вертолета Ка-50	355
17.2.	Тренажер массового автомобиля	362
17.3.	Железнодорожные тренажеры	374
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		378

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АБТ	– Аппаратура бортового телевидения
АИВО	– Автономный имитатор визуальной обстановки
АСПК	– Автономное средство перемещения космонавта
АСПК ПК	– Автоматизированная система планирования и контроля подготовки космонавтов
АКОД	– Автоматизированный контроль и оценка операторской деятельности
АКОР	– Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов
АМ	– Аналоговый мультимплексор
АЦП	– Аналого-цифровой преобразователь
АЭС	– Атомная электростанция
БВС	– Бортовая вычислительная система
БКТ	– Бортовой компьютерный тренажер
БПС	– Блок преобразования сигналов
БРВИ	– Блок ручного ввода информации
БРУС	– Блок ручного управления светильниками
БС	– Бортовая система
БФС	– Блок формирования сюжетов
БЦВК	– Бортовой цифровой вычислительный комплекс
ВК	– Вычислительный комплекс
ВКУ	– Видеоконтрольное устройство
ВПКУ	– Выносной ПКУ
ВС	– Вычислительная система
ВСК-4	– Оптический визир
ГП	– Главный пост
ГОСТ	– Государственная система стандартов
ГС	– Гидросреда
ГНШК	– Гарнитура нашиваемая космонавта
ДОС	– Долговременная орбитальная станция
ЕКА	– Европейское космическое агентство
ИПО	– Инструментальное программное обеспечение
ИС	– Информационная система
КА	– Космический аппарат
КГС	– Коммутатор групповой связи
КИЕС	– Коммутатор интерфейсов ЕС-ЭВМ

КИОД	– Комплекс итоговой обработки данных
КИСМ	– Коммутатор интерфейсов СМ-ЭВМ
КТ	– Контрольная точка
КТ РС	– Комплекс тренажеров Российского сегмента МКС
КУБС	– Контроль управления бортовыми системами
КУНП	– Контроль управления непрерывными процессами
ЛВС	– Локальная вычислительная сеть
МВК	– Модуль временного контроля
МК	– Моделирующий комплекс
МКИО	– Мультиплексный канал информационного обмена
МКР	– Модуль контроля расходования ресурсов
МКС	– Международная космическая станция
МЛК	– Модуль логического контроля
МММС	– Магистрально-модульные микропроцессорные системы
МОБ	– Математическая модель объекта
МП	– Медицинский прибор
МПК	– Модуль параметрического контроля
МРПК	– Модуль расчета комплексных показателей
МТ	– Мобильный тренажер
МТГ	– Микротелефонная гарнитура
МФИ	– Многофункциональный экраный индикатор
НАС	– Нештатная аварийная ситуация
НУ	– Начальные условия
ОВК	– Особо важные команды
ОК	– Орбитальный комплекс, обеспечивающий комплекс
ОКУ	– Оптическое коллимационное устройство
ОМО	– Общее математическое обеспечение
ОООД	– Объективная оценка операторской деятельности
ОС	– Операционная система
ОУ	– Органы управления
ОЭИ	– Оптимальный электронный инструктор
ПАПС	– Пульт аварийно-предусмотрительной сигнализации
ПВ	– Пульт врача
ПГ	– Пневмограмма
ПК	– Персональный компьютер
ПКА	– Пилотируемый космический аппарат

ПКС	– Пульт контроля систем
ПКУ	– Пульт контроля и управления
ПНС	– Панель связи
ПО	– Программное обеспечение
ПОДУ	– Пульт объединенной двигательной установки
ПРВИ	– Пульт ручного ввода информации
ПРО	– Пульт руководства обучением
ПФК	– Психофизиологический контроль
ПЭВМ	– Персональная электронно-вычислительная машина
РГНИИЦПК	– Российский государственный научно-исследовательский испытательный Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина
РМИ	– Рабочие места инструкторов
РМО	– Рабочее место операторов
РУД	– Ручка управления движением
РУО	– Ручка управления ориентацией
РУС	– Ручка управления спуском
СА	– Спускаемый аппарат
СВО	– Система внутреннего освещения
СВР	– Система виртуальной реальности
СЖО	– Система жизнеобеспечения
СИАШ	– Система имитации акустических шумов
СИАО	– Система имитации акселерационной обстановки
СИВО	– Система имитации визуальной обстановки
СИУОУ	– Система имитации усилий на органах управления
СК	– Скафандр
СКГИ	– Система компьютерной генерации изображений
СМ КП	СМ ЭВМ коллективного пользования
СМО	– Специальное математическое обеспечение
СМ-Черемуха	– СМ ЭВМ системы имитации приборной информации
СН	– Средство наблюдения
СОИ	– Система отображения информации
СОСБ	– Система ориентации солнечных батарей
СОТР	– Система обеспечения теплового режима
СПО	– Специальное программное обеспечение
СПФК	– Система психофизиологического контроля
ССв	– Система связи

СТК	– Система телефонно-телеграфной связи
СУБК	– Система управления бортовым комплексом
СУД	– Система управления движением
СУТ	– Система управления тренировкой
СЧМ	– Система "человек – машина"
СЭП	– Система электропитания
ТВА	– Телевизионная аппаратура
ТВК	– Телевизионная камера, терминальный вычислительный комплекс
ТЗ	– Техническое задание
ТК	– Транспортный корабль
ТГК	– Транспортный грузовой корабль
ТОРУ	– Телеоператорный режим управления
ТПО	– Тестовое программное обеспечение
ТРИО	– Тренажная распределенная исполнительная оболочка
ТСПК	– Технические средства подготовки космонавтов
ТСНО	– Технические средства подготовки операторов
ТСЭ	– Табло световое электролюминисцентное
УИВК	– Универсальный информационно-вычислительный комплекс
УМ	– Унифицированный модуль
УОИ	– Устройство отображения информации
УОС	– Устройство оптического сопряжения
УСО	– Устройства сопряжения с объектом
УТМ	– Учебно-тренировочный макет
УФИ-З	– Унифицированный формирователь изображения Земли
УФИ-КА	– Унифицированный формирователь изображения космического аппарата
ФИ	– Формирователь изображений
ФМД	– Формализованная модель деятельности
ФОД	– Функционал обобщенной работы
ЦАП	– Цифроаналоговый преобразователь
ЦДС	– Центральная диспетчерская служба
ЦМ	– Целевой модуль
ЦУП	– Центр управления полетами
ЧТЗ	– Частное техническое задание
ЭКГ	– Электрокардиограмма
ЭКТ	– Экзаменационная комплексная тренировка
ЭФС	– Электрофизиологические сигналы

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие цивилизации сопровождается постоянным усложнением создаваемых технических систем и расширением их использования во всех сферах человеческой деятельности.

Одним из главнейших условий эффективного управления техническими движущимися и недвижимыми объектами, человеко-машинными системами и технологическими комплексами, а также обеспечение их грамотной эксплуатации является специальная высокопрофессиональная подготовка персонала (операторов, экипажей, команд) для этих целей. Особые требования предъявляются к персоналу, который обеспечивает управление воздушным движением, космическими аппаратами, самолетами, вертолетами, морскими надводными и подводными кораблями, сухопутной боевой техникой, наземными железнодорожными и автомобильными транспортными средствами, атомными электростанциями, энергосистемами, техническими средствами систем вооружения, сложными и опасными технологическими процессами.

Мировая статистика свидетельствует о том, что причиной более 70...80 % авиакатастроф является человеческий фактор, ошибки пилотов, их неподготовленность к управлению самолетом в нештатных, непредвиденных и аварийных ситуациях, а иногда и в обычных условиях.

Несмотря на то, что ученые, инженеры и конструкторы, создавая новые машины, стремятся делать их максимально надежными и безопасными, в процессе их функционирования нередко возникают сбои, чрезвычайные ситуации, а иногда – аварии и катастрофы. В ряде случаев их виной являются технические отказы, ошибки и просчеты конструкторов, недостаточно полный учет разнообразия факторов и условий, в которых может оказаться управляемый объект. Однако в подавляющем большинстве случаев причиной аварии являются ошибки операторов: неправильная оценка ситуации, несвоевременная реакция, некомпетентность, растерянность, отсутствие опыта и навыков выхода из сложных или непредвиденных ситуаций.

Конечно, управление современными техническими объектами представляет, как правило, весьма непростую задачу. Оператор должен воспринимать и перерабатывать огромный объем информации, причем время для принятия решения и его реализации ограничивается порой долями секунд. Например, пульта операторов АЭС или кабины современных самолетов оснащены десятками и сотнями приборов, а реакция на возникновение критической ситуации должна быть практически мгновенной.

Для того чтобы управляющие техникой операторы и эксплуатирующий ее персонал уверенно и правильно действовали в самых различных, в том числе и аварийных ситуациях, практически во всех сферах применения сложной техники создаются системы и центры подготовки и переподготовки персонала операторов, которые управляют техническими объектами. Задачей таких систем и центров является отбор операторов (для исключения лиц, непригодных к данному роду деятельности), достаточно глубокая теоретическая и профессиональная практическая подготовка – формирование умений и навыков в управлении соответствующими объектами.

Профессиональная практическая подготовка операторов осуществляется преимущественно на базе тренажеров, которые моделируют работу реальных объектов и воспроизводят близкие к реальным условия его функционирования, внешнюю среду, все то, что происходит в процессе управления объектом, а также все то, что видят и ощущают при этом операторы.

Обучение оператора на тренажере обычно бывает значительно более эффективным, чем обучение на реальном объекте. При использовании тренажеров в несколько раз сокращается стоимость и время подготовки оператора к практической деятельности, экономятся ресурсы штатных объектов, снижается риск и негативные последствия, связанные с неправильными действиями неопытных операторов. Но это даже не главное. При использовании тренажеров появляется возможность многократно моделировать без риска катастрофы, различные критические, предаварийные и аварийные ситуации, которые воспроизвести на реальном объекте невозможно. А ведь именно в таких ситуациях, которые в реальных условиях возникают относительно редко, но всегда помогают опыт, и поэтому особенно важно формировать у

операторов навыки быстро и правильно действовать в критических ситуациях.

В силу указанных причин тренажеры находят все более широкое применение при подготовке пилотов и космонавтов, штурманов и капитанов морских судов, операторов боевых постов и экипажей боевых машин, персонала АЭС, ракетчиков, стрелков, спортсменов, хирургов, представителей других профессий.

Одно из направлений развития тренажерной техники связано с созданием тренажерных комплексов, которые объединяют несколько тренажеров, работающих одновременно. Модульное построение тренажерного комплекса и унификация технических и программных средств тренажеров позволяет, с одной стороны, повысить рентабельность использования дорогостоящих средств подготовки персонала, с другой стороны, обеспечить отработку взаимодействия экипажей нескольких объектов при выполнении общей задачи.

В настоящее время большая часть крупных отечественных и зарубежных тренажеростроительных фирм идет по пути создания унифицированных модульных тренажеров и тренажерных комплексов.

В предлагаемой читателю монографии излагаются основные идеи, положенные в основу построения таких комплексов, и пути их реализации при разработке базовых систем тренажерных комплексов и создании самых различных средств подготовки операторов, в том числе, компьютерных комплексов для начальной подготовки специалистов, бортовых тренажеров, тренажерных комплексов профессиональной подготовки операторов на базе полномасштабных макетов управляемых объектов и на базе технологий виртуальной реальности. В качестве иллюстрации предлагаемых подходов и разработанных технологий приводится множество примеров их практического использования применительно к созданию космических, авиационных, железнодорожных, автомобильных и мор-

ских тренажеров и средств подготовки операторов.

В первом разделе рассматриваются основные задачи, связанные с подготовкой операторов, способы их решения и обосновываются перспективные подходы к структурному построению тренажерных комплексов и тренажеров, а также технология их создания.

Во втором разделе рассматриваются вопросы методического обеспечения подготовки операторов к управлению сложными объектами, планирования программы подготовки операторов, оценки качества выполнения упражнений и их готовности к управлению реальным объектом.

В третьем разделе излагаются инженерные методики и подходы к созданию основных технических и программных систем и тренажеров, входящих в структуру тренажерных комплексов.

В четвертом разделе приводятся результаты практического использования указанных подходов на примере разработки и опыта эксплуатации комплекса предтренажерной подготовки космонавтов, созданного с применением технологии виртуальной реальности, трех поколений тренажерных комплексов подготовки космонавтов в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, а также комплексного вертолетного тренажера, тренажеров для подготовки машинистов электровозов, водителей автомобилей, создание которых осуществлялось с участием авторов монографии.

Книга будет полезна специалистам, осуществляющим создание и эксплуатацию средств профессиональной подготовки операторов, а также преподавателям и студентам вузов, специализирующихся в области имитационного моделирования.

Раздел I

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ

Глава I

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ТРЕНАЖЕРНОЙ ТЕХНИКЕ

1.1. РОЛЬ И МЕСТО ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ В СИСТЕМЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Обучение операторов управлению сложными объектами – это своеобразный технологический процесс, который включает в себя ряд этапов и видов подготовки с учетом особенностей и характера будущей деятельности. Например, в программах подготовки космонавтов предусматривается медико-биологическая, летно-парашютная подготовка, тренировки по выживанию в экстремальных условиях, теоретическая и техническая подготовка по системам ПКА, практическая отработка навыков и умений по управлению и обслуживанию космических систем, подготовка по научной программе и т.д. При этом в профессиональной подготовке космонавтов выделяется ряд этапов: сначала проводится общекосмическая подготовка, затем подготовка в специализированных группах, а после включения космонавта в состав экипажа проводится подготовка по программе конкретного полета.

Независимо от характера деятельности оператора в процессе его обучения можно выделить два вида профессиональной подготовки: теоретическую и практическую.

В результате теоретической подготовки обучаемый персонал должен получить глубокие и прочные знания об управляемом объекте, принципах построения и логике функционирования его систем, о физических законах, определяющих взаимодействие управляемого объекта с другими объектами и внешней средой, о динамических характеристиках и возможностях объекта, об органах управления и контроля и методах управления объектом в различных ситуациях.

Профессиональная практическая подготовка призвана сформировать у оператора умения и навыки, которые позволяют ему уверенно осуществлять управление объектом в простых, сложных и критических ситуациях.

Решить проблемы подготовки можно используя тренажеры, в которых воспроизводятся такие же условия работы оператора, какие имеют место на реальном объекте (рис. 1.1, см. цветную вставку). В тренажерах на основе использования средств вычислительной техники осуществляется моделирование работы систем управляемого объекта, динамики его перемещения в пространстве, внешней среды и тех объектов, которые находятся в этой среде и влияют на функционирование объекта, управляемого оператором. Результаты моделирования отображаются

на приборных панелях, которые содержат такие же приборы, индикаторы и органы управления, как и реальный объект. Обучаемый оператор становится элементом контура моделирования. Его воздействия на органы управления передаются на вход модели объекта, и в результате воспроизводится такое поведение этого объекта, каким бы оно было в реальных условиях при таких же управляющих воздействиях.

Наряду с контуром моделирования работы объекта в тренажере формируется контур управления моделируемыми ситуациями со стороны инструктора. Инструктор задает исходную ситуацию, целенаправленно изменяет внешние условия, задает критические и аварийные ситуации, а затем оценивает правильность действий обучаемого.

Использование тренажеров более экономично, чем обучение на реальном объекте. Затраты на подготовку операторов движущихся объектов при использовании тренажеров снижаются ориентировочно в 8–10 раз. Предупреждение хотя бы одной крупной морской аварии за счет повышения уровня подготовки судоводителей целиком окупает все затраты на внедрение тренажеров в морском флоте.

При использовании тренажеров снижается время обучения, расход топлива и других ресурсов управляемых объектов, повышается безопасность. Выполнение, например, полета на самолетном тренажере не зависит от метеословий, от загруженности зоны аэродрома, не оказывает негативного влияния на экологическую среду.

Практика использования тренажеров для судоводителей показала, что за одну неделю на тренажере может быть отработано такое количество сложных маневров, для выполнения которых на реальном судне даже при благоприятных гидрометеорологических условиях потребовалось бы несколько месяцев.

На тренажере можно многократно повторять особо сложные операции

управления до полного освоения их обучающимися, при необходимости повторять их в замедленном или ускоренном темпе, осуществлять запись процесса выполнения упражнения и затем производить анализ каждого действия. Все это значительно ускоряет процесс становления профессионализма операторов по сравнению с другими традиционными методами обучения.

В силу этого тренажеры находят широкое применение в самых различных областях человеческой деятельности, в том числе при подготовке хирургов, спортсменов, машинистов электропоездов, технического и обслуживающего персонала.

Тренажеры активно используются в вооруженных силах всех государств.

Наиболее широко используется тренажерная техника для практической подготовки летного и инженерно-технического состава стратегических бомбардировщиков и самолетов-заправщиков, истребительной и военно-транспортной авиации, самолетов и вертолетов военноморских сил и армейской авиации. На тренажерах отрабатываются задачи наземного обслуживания и пилотирования: взлета, посадки, ведения воздушного боя, опознавания и атаки наземных целей, аварийного покидания в различных метеословиях, в том числе в аномальных ситуациях, при отказах двигателей и других неисправностях.

В сухопутных войсках тренажеры применяются для подготовки экипажей танков, боевых машин пехоты, водителей военных автомобилей, для привития правильных навыков применения мотострелкового, артиллерийского и зенитного оружия без проведения стрельб с использованием боеприпасов. В морском флоте тренажеры эффективно применяются для отработки навыков ведения боевых действий, подготовки офицеров и операторов, работающих за пультами надводных и подводных кораблей.

Последние годы тренажеры находят все более широкое применение для профессиональной подготовки и переподготовки персонала промышленных предприятий. Из-за ошибок операторов, например, типовой нефтеперерабатывающий завод производительностью 10 млн. тонн в год ежегодно теряет примерно 1,1 млн. долларов. Необходимость использования тренажеров для подготовки персонала в промышленности обусловлена также требованиями к повышению безопасности на производстве, а также внедрением новых информационных технологий в управлении производственными процессами, что, в свою очередь, требует качественно новых знаний и навыков у персонала.

Следует отметить, что тренажеры эффективно используются не только для подготовки персонала и поддержания навыков выполнения ответственных операций. При создании новых изделий с применением тренажеров проводятся исследования, связанные с эргономикой, эффективностью выбора состава средств контроля и управления, исследования психофизиологических возможностей и способностей человека. Тренажная техника используется для отработки эксплуатационной документации. Моделирующий комплекс тренажера можно использовать для поиска и анализа причин произошедших катастроф и выработки путей их предотвращения.

Для подготовки и переподготовки персонала во многих областях человеческой деятельности создаются специализированные центры, в которых концентрируется методическая база и технические средства обучения, в том числе тренажеры. Тренажеры такого специализированного учебного центра целесообразно объединять в интегрированные тренажерные комплексы, обеспечивающие гибкое использование ресурсов, возможность повторного использования одних и тех же средств, а также одновременную работу нескольких операторов (или экипажей),

отрабатывающих выполнение во взаимодействии некоторой общей задачи (работа персонала смены электростанции, совместный полет вертолетов, взаимодействие пилотов с наземными службами управления, отработка тактической задачи с участием экипажей самолетов, надводных и подводных кораблей, танков, а также штабов и командования различных родов войск).

Для решения некоторых задач могут объединяться средства нескольких территориально распределенных центров. Так, специалистами РГНИЦПК им. Ю.А. Гагарина и Европейского космического агентства была создана и апробирована система распределенного интерактивного моделирования совместного полета нескольких космических аппаратов, причем моделирование полета европейской модулей осуществлялось ЕКА, а моделирование российских космических объектов производилось в РГНИЦПК им. Ю.А. Гагарина.

Рациональное построение тренажерных комплексов требует применения особых технологий, обеспечивающих информационное, аппаратное и программное сопряжение тренажерных средств, многократное, экономически рентабельное использование ресурсов, возможность постоянной модернизации тренажеров и расширение их состава.

1.2. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ НА БАЗЕ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ НА ПРИМЕРЕ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ К КОСМИЧЕСКОМУ ПОЛЕТУ

В процессе выполнения Федеральной космической программы (ранее СССР, а в настоящее время России) накоплен большой опыт создания и использования технических средств подготовки космонавтов к выполнению программ кос-

мических полетов пилотируемых транспортных кораблей и орбитальных станций. Одной из характерных особенностей задач подготовки космонавтов является их многофункциональность, которая в свою очередь определяется составом задач, решаемых с использованием пилотируемых космических аппаратов в рамках множества разнородных космических программ, реализуемых в настоящее время.

Многофункциональный характер задач подготовки космонавтов на тренажерах определяется также сложной структурой операторской деятельности, ее многоуровневостью, многомерностью, адаптивностью (изменчивостью, динамичностью), специфическим характером условий полета. Например, особенности пилотирования транспортного космического корабля, с одной стороны, различны на разных этапах полета (сближение, причаливание и стыковка, расстыковка и отвод), а с другой стороны, процесс полета осуществляется в условиях многообразного информационного сопровождения, он насыщен целым рядом ограничений, может сопровождаться нештатными ситуациями, а результат стыковки может иметь необратимый характер. Деятельность оператора в этих условиях характеризуется сенсорными (восприятие, ощущение) и речемыслительными уровнями, уровнями представлений.

При решении задач управления реальными космическими объектами можно назвать следующие этапы деятельности оператора:

- восприятие информации – процесс, включающий в себя операции обнаружения объекта; восприятия; выделения в объекте отдельных признаков, отвечающих стоящей перед оператором задаче; ознакомления с выделенными признаками и опознания объекта восприятия;
- оценка информации, ее анализ и обобщение на основе заранее заданных

или сформированных в процессе обучения критериев оценки. Оценка производится путем сопоставления воспринятой информационной модели со сложившейся у оператора внутренней образно-концептуальной моделью процесса;

- принятие решения о действиях – акт, формируемый на основе проведенного анализа информационной и образно-концептуальной моделей обстановки;
- исполнение принятого решения посредством определенного действия или соответствующего распоряжения;
- контроль за результативностью исполнения принятого решения.

Первые два этапа представляют информационный поиск, последние три объединяются понятием обслуживания. В реальной работе оператора информационный поиск и обслуживание взаимообусловлены, так как от принятого решения зависит направление следующего шага информационного поиска. В свою очередь результаты информационного поиска влияют на точность и скорость обслуживания. Все эти этапы необходимо наиболее полно воспроизводить на тренажере.

Из анализа этапов деятельности оператора при решении задач управления космическим объектом видно, что для формирования и совершенствования профессиональных навыков операторов на тренажерах необходимо создание такой информационной модели воспроизводимых условий в реальном масштабе времени, чтобы зрительное восприятие и моторная реакция оператора не отличались от таковых в реальных условиях [149].

Для того чтобы воспроизвести условия реального процесса на тренажере, необходимо реализовать математическую модель движения объекта и модели всех основных систем. При этом, в соответствии с управляющими воздействиями обучаемого оператора, в реальном масштабе времени воспроизводится ситуация, аналогичная ситуации, возникающей на реальном космическом объекте. Получае-

мые в результате моделирования параметры должны выводиться на приборы и другие средства индикации панелей оператора. В средствах наблюдения оператора (иллюминаторах) должна наиболее полно воспроизводиться внешняя обстановка на основе использования специальных средств – имитаторов визуальной обстановки, связанных с моделью динамики поведения объекта таким образом, чтобы наблюдаемая оператором картина соответствовала реальной при аналогичном состоянии объекта.

В соответствии с ГОСТ 21036–75, *тренажер* – это техническое средство подготовки человека-оператора, реализующее физическую и (или) функциональную модель системы "человек-машина" и ее взаимодействие с предметом труда и внешней средой, обеспечивающее постоянный контроль качества деятельности обучаемого (обучаемых) и предназначенное для формирования и совершенствования у него (у них) профессиональных навыков и умений, необходимых ему (им) для управления СЧМ [36].

Тренажерным комплексом называется совокупность программно-аппаратных средств, образующих единую для всех тренажеров систему коллективного пользования, единых принципов и технологий формирования тренажеров на его базе, а также собственно тренажеров, входящих в его состав.

Комплексом тренажеров называется совокупность тренажеров, необходимых для решения всего комплекса взаимосвязанных задач единой программы. Комплекс тренажеров может состоять из отдельных автономных тренажеров, из тренажеров, входящих в тренажерный комплекс, или из совокупности тренажеров тренажерного комплекса и автономных тренажеров.

Тренажер, предназначенный для подготовки космонавтов, должен обеспечивать [149]:

- ознакомление с рабочим местом оператора, размещением и взаимным расположением всех приборов и элементов управления;
 - изучение характеристик силовых установок космического объекта во всех режимах;
 - изучение динамических характеристик космического аппарата в нормальных и сложных условиях полета;
 - изучение бортовых систем, научно-го и приборного оборудования космического объекта;
 - отработку задач управления бортовыми системами и научным оборудованием, применения индивидуальных средств жизнеобеспечения, телевизионных и радиосредств;
 - тренировку контроля технического состояния и осуществления корректирующих воздействий;
 - тренировку по выполнению совокупности действий в нештатных ситуациях полета и др.
- Но в общем случае, тренажер должен выполнить две основные функции:
- моделирование условий работы оператора;
 - обучение и контроль действий обучаемого со стороны инструктора-методиста.

Многofункциональность задач подготовки в качестве основного признака легла в основу классификации тренажеров, которая будет подробно рассмотрена ниже.

1.3. НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Научно-технический прогресс вообще и информатизация общества в частности приводят к радикальным изменениям технических средств обучения и методов подготовки специалистов разных профилей.

Космические и авиационные аппараты, морские суда, атомные электростанции и им подобные объекты относятся к классу сложных систем, характерными чертами которых являются:

- многомерность (значительное количество контролируемых и неконтролируемых входных, промежуточных и выходных параметров: тяги, скорости вращения валов, температуры газов в горячей части двигателя по сечениям, расход топлива (воздуха), параметры внешней среды и их производные по сечениям в холодной части двигателя, характеристики камер сгорания, форсажных камер, показатели процессов горения топлива и т.д.);

- многосвязность элементов системы (входные устройства, компрессоры, вентиляторы, винты, камеры сгорания, турбины, форсажные камеры, камера смешения, выходные устройства и другие элементы первого и второго контуров двигателя связаны между собой агрегатами ручного и автоматического управления посредством механических и газодинамических потоков различного направления);

- многообразие структуры объекта (многоконтурность двигателя и его систем регулирования, иерархические зависимости между характеристиками процессов и параметров двигателя, разветвленность материальных и энергетических потоков);

- многообразие природы элементов системы (одновременное протекание механических, термо- и газодинамических, химических и других процессов);

- многократность изменения состояния объекта (вступление в работу дополнительных агрегатов создания тяги: форсажных камер, газовых инжекторов, турбовентиляторов; изменение геометрии двигателя; регулирование входных и выходных устройств, отклонение тяги, открытие и закрытие клапанов перепуска воздуха; изменение режимов путем перестройки регуляторов; ограничение предельно допустимых значений параметров

и т.д. из-за внешних условий и по командам операторов);

- многокритериальность оценки функционирования объекта (для увеличения тяги целесообразно повышать обороты ротора двигателя, но по условиям его механической прочности ограничивают их максимальные значения; для увеличения мощности газовых турбин рационально увеличивать перепад температур на них, однако условия термостойкости накладывают свои ограничения на этот перепад; условия безопасного ухода самолета на второй круг требуют уменьшения времени приемистости, но оно не может быть ниже определенного значения из-за неустойчивой работы камер сгорания на переходных режимах и т.д.);

- мультидисциплинарность (использование многих областей знаний при создании и использовании систем управления: термо- и газодинамики, технической механики, теории механизмов и машин, теории авиадвигателей, теории автоматического регулирования, сопротивления материалов и др.).

Вышеизложенные характерные черты космических и авиационных аппаратов, морских судов, атомных электростанций как сложных объектов свидетельствуют о том, что в общем случае задача подготовки операторов объектов является задачей многофункциональной. Она может быть решена путем использования целого набора разнородных технических средств подготовки операторов:

- комплексных тренажеров;
- специализированных тренажеров;
- тренажеров и стендов по системам и функционально-моделирующим стендов;

- имитаторов факторов или условий применения объектов (гидролаборатория, центрифуга, барокамерный комплекс, планетарий и т.п.);

- учебно-тренировочных и натуральных макетов кораблей, станций, модулей;

- летающих лабораторий, самолетов-аналогов и др.

Технические средства подготовки операторов имеют различное функциональное назначение, но в общем случае можно выделить два типа их построения: автономные тренажеры и тренажерные комплексы или системы.

Каждый автономный тренажер разрабатывается как уникальное изделие, позволяющее проводить подготовку космонавтов (операторов) к выполнению задач на штатном изделии. Его состав, структура и алгоритмы функционирования в полной мере определяются объемом и характером задач, которые решает космонавт (оператор), и техническими средствами, с которыми он работает на реальном космическом аппарате.

С учетом этого, прежде всего, формируются технические требования на тренажер, определяющие его функциональные возможности, решаемые задачи, объем моделируемых бортовых систем, состав средств имитации факторов полета, используемое оборудование.

В качестве рабочего места операторов обычно используется макет рабочей зоны космического аппарата, оснащаемый, как правило, штатным оборудованием, которое используется в отработываемых задачах. Это обеспечивает идентичность условий работы экипажа на тренажере и в полете. Далее разрабатываются алгоритмы и программы математического моделирования систем штатного космического аппарата, определяются методы построения средств имитации визуальной обстановки и других факторов полета; осуществляется разработка этих средств.

На основе оценки вычислительных задач, связанных с моделированием, управлением имитационными системами и процессом тренировки в целом, определяется количество и тип вычислительных средств, а затем разрабатываются средства сопряжения систем тренажера. После выполнения автономной и комплексной отладки производится различное виды испытаний для установления соответствия тренажера требова-

ниям Технического задания, бортовой документации и для исключения ложных навыков при работе экипажа как в штатных, так и в нештатных и аварийных ситуациях.

Основные особенности и недостатки описанной технологии создания космических тренажеров состоят в следующем.

1. В силу сложности бортового оборудования пилотируемых космических аппаратов и необходимости обеспечения высокой точности и полноты моделирования работы всех систем и физических факторов космического полета, время, необходимое на создание тренажера (даже с привлечением самых опытных специалистов), обычно превышает 3–4 года.

При этом разработка тренажера начинается практически после завершения проектирования штатного ПКА, которым должен управлять экипаж космонавтов, точнее, после получения исходных данных о его составе, структуре, режимах и алгоритмах работы бортовых систем. Только после этого могут быть определены требования к системам тренажера, его возможностям и характеристикам.

Макет пилотируемого космического аппарата, на основе которого формируется рабочая среда деятельности экипажа космонавтов, строится обычно на базе одного из образцов штатного ПКА после проведения испытаний, предусмотренных регламентом их создания. А так как период времени от проведения испытаний штатного ПКА до старта первого экипажа относительно небольшой, то за это время практически невозможно выполнить работы по замене кабельной сети, бортового оборудования, сопряжения его с моделирующим комплексом и имитационными системами, комплексной отладке, испытаниям тренажера, а также обеспечить подготовку экипажа на его основе.

Таким образом, одним из основных недостатков существовавшей технологии построения автономных тренажеров является невозможность обеспечения своевременной подготовки первых экипажей,

обеспечивающих летные испытания новых пилотируемых аппаратов.

2. Общеизвестно, что принципиальной особенностью космической техники является ее постоянное совершенствование, модернизация оборудования, введение в ее состав новых систем и реализация новых режимов работы. Для обеспечения полного соответствия моделируемых в тренажере систем штатного ПКА при любом таком изменении необходимо синхронно проводить и модернизацию космического тренажера, причем корректироваться должна не только модель изменяемого узла ПКА, но и все, что с ним связано (технические, программные и информационные средства).

Но организации – разработчики тренажера обычно выбирают структуру и возможности технических средств (вычислительной системы, средств имитации внешней визуальной обстановки, устройств сопряжения с объектом и т.д.), на которых строится тренажер, для обеспечения выполнения требования только первоначального технического задания на тренажер и не закладывают резерв (обычно в силу чисто экономических причин) на его модификацию или доработки под новые задачи. В результате, при необходимости доработки тренажера ресурсов его технических средств не хватает и зачастую она превращается в разработку практически нового тренажера. Это приводит, как правило, к прерыванию процесса подготовки на данном тренажере на длительное время, что серьезно усложняет решение задач своевременной подготовки очередных экипажей космонавтов к полетам.

3. Стоимость космических тренажеров очень большая. В то же время степень эффективного использования его средств, обычно, недостаточна. Большая часть тренажеров используется менее 50 % рабочего времени, а после завершения эксплуатации его компоненты даже при их удовлетворительном техническом состоя-

нии в силу своего морального старения использоваться не могут.

4. В связи с тем, что для создания конкретных автономных космических тренажеров привлекались ряд организаций, тренажеры строились на различных технических принципах и зачастую большой номенклатуре уникальных технических средств (вычислители, средства имитации внешней визуальной обстановки, устройства сопряжения с объектами и др.), что, в свою очередь, вело к усложнению и существенному удорожанию процесса эксплуатации автономных тренажеров.

Таким образом, технология построения автономных (уникальных) тренажеров в недостаточной мере обеспечивает экономичность использования их средств, удобство эксплуатации, гибкость и возможность их последующего развития, что и потребовало разработки новых принципов и новой технологии создания тренажерных средств, которые были бы лишены указанных недостатков и позволили бы существенно повысить эффективность разработки, создания и эксплуатации комплексных и специализированных тренажеров.

1.4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО РЕШЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Любой тренажер, вне зависимости от сложности и объема решаемых задач, представляет собой, как минимум, двух-контурную систему переработки информации. Внутренний контур обеспечивает моделирование и воспроизведение условий и факторов, аналогичных тем, которые имеют место в процессе работы оператора при управлении реальным объектом, внешний контур образует система контроля и управления как тренировкой, так и всем процессом подготовки опера-

тора [149]. Если рассматривать тренажерный комплекс, то в нем количество контуров управления значительно возрастает. В тренажерных комплексах принята интегрально-факторная организация интеллектуального взаимодействия между операторами, позволяющая получать согласованную реализацию оптимального решения задачи. На основе индивидуальных, частных информационных моделей операторы строят ситуативную адекватную интегральную модель конкретной задачи.

Тренажеры и тренажерные комплексы как обучающие СЧМ, созданные на базе современных информационных средств и технологий, с уверенностью можно отнести к системам гибридного интеллекта. Под гибридным интеллектом в инженерной психологии понимаются адаптивные системы взаимодействия, предназначенные для интенсификации обучения и решения интеллектуальных задач, оптимального использования способностей каждого оператора-индивида и возможностей ЭВМ, автоматизированных обучающих систем и других технических средств деятельности [29]. Отличительными особенностями систем гибридного интеллекта являются:

- многоуровневая взаимная адаптация компонентов системы;
- реализация принципа разделения труда между специалистами при решении частных, специальных задач;
- при необходимости решения глобальной, комплексной задачи функционирование партнеров как единого оператора, общее ответственность, гибкое перераспределение лидерства и вспомогательных функций между партнерами в зависимости от конкретной задачи и хода ее решения;
- совместный анализ и синтез информации, адаптированный к индивидуальным особенностям партнера, принимающего в данном случае решение, и направленный на формирование у него аде-

кватной модели ситуации как основы принятия решения;

- обработка и представление информации в виде, соответствующем оптимальным значениям психологических факторов сложности.

Системы гибридного интеллекта включают в себя естественный и искусственный интеллект. *Искусственный интеллект* – это интеллектуальная система (в нашем случае тренажер, тренажерный комплекс или комплекс тренажеров), реализующая максимальное значение коэффициента корреляции априорных и реальных стратегий решения задач.

Естественный интеллект – это совокупность интеллектов разработчиков и исследователей, заложенная в создание тренажера, а также интеллект тех специалистов, которые непосредственно работают с тренажером. По существу тренажер или тренажерный комплекс является интеллектуальной управляющей системой, которая контролирует процесс сквозного моделирования работы и динамики объекта и управляет ходом тренировки.

Системы гибридного интеллекта, в том числе тренажеры, создаются по принципам самоорганизации и предназначены для уточнения задач, генерирования широкого спектра идей и подходов к их решению, синхронизации всех участвующих интеллектов на определенных отобранных подходах в целях синтеза адекватной модели изучаемой ситуации, нахождения и согласованной реализации оптимального решения задачи. С этой точки зрения процесс разработки тренажера как интеллектуальной системы является многоэтапным и итерационным. Он основан на системном анализе многолетнего опыта создания поколений космических тренажеров для подготовки отечественных и международных экипажей и синтезе интеллектов широкого круга специалистов, участвующих в разработке и эксплуатации летных изделий, тренажеров и тренажерных систем.

Проблематичность выработки конкретных требований к перспективным тренажерам пилотируемых космических аппаратов заключается в том, что в долгосрочном плане не могут быть достаточно конкретизированы как сами методы, так и объекты деятельности космонавтов. Поэтому на ранних стадиях разработки тренажеров формируются общие требования к тренажеру и его подсистемам, исходя из состава задач, которые должен выполнять экипаж в процессе реализации программы полета. Уточнение отдельных требований к разрабатываемым тренажерам производится на этапе эскизного и технического проектов. На этих этапах проводится детальная проработка структуры тренажера, исходя из анализа функционально-алгоритмической структуры процесса обучения, контроля и управления тренировок.

Решающее значение имеют выбор аппаратных средств, на основе которых должен создаваться тренажер, и методов моделирования. В дальнейшем, в результате системного анализа деятельности экипажей в ходе космического полета на борту станции и результатов тренировок экипажей на разрабатываемом тренажере, конкретизируются и корректируются требования к имитируемому бортовым системам тренажера, интеллектуальному интерфейсу экипажа и инструктора.

Тренажерные комплексы разрабатываются на основе принципов открытости сетей и вычислительных систем и модульного построения аппаратно-программных средств, что обеспечивает возможность создания на их базе новых тренажеров по мере развития программы подготовки операторов. Тренажерный комплекс состоит из функционально связанных между собой тренажеров, которые могут работать как автономно, так и совместно.

При создании современных тренажерных комплексов получили развитие следующие направления использования новых информационных технологий:

- реализация сетевых технологий построения вычислительных систем. Эти технологии в полной мере соответствуют принятой концепции построения тренажерного комплекса и обеспечивают интеграцию средств подготовки космонавтов в рамках взаимодействующих систем. Объединяются и коммутируются также каналы телевидения и связи;

- построение электронных и программных систем имитации визуальной и акустической обстановки, соответствующей воспроизводимым условиям космического полета;

- использование дисплеев пультов контроля и управления тренажерками. Приборы - повторители штатного объекта практически перестали применять на пультах инструкторского контроля;

- использование средств мультимедиа для создания компьютерных обучающих курсов по изучению эксплуатируемых объектов и способов управления ими.

- создание моделирующих комплексов на базе систем виртуальной реальности (СВР), позволяющих исключать физическое оборудование макета космического аппарата.

"Интеллектуализация" тренажеров и тренажных комплексов выражается в осуществлении основных двух групп функций:

- поддержка (обеспечение) принятия решения пользователей;

- адаптация пользовательского интерфейса.

Первая группа функций заключается в правильной организации:

- учебной информационной модели на рабочем месте оператора;

- информационно-управляющей модели на пультах контроля и управления.

При разработке тренажерных комплексов основной задачей является создание таких интегральных информационных моделей, которые бы были адекватны реальной ситуации или объекту, соответствовали оптимальным значениям психологических факторов сложности решения,

содержали минимум информации и были бы в то же время информационно полными для решения задачи.

Рассмотрим, как обеспечивается реализация групп функций поддержки (принятия) решения пользователей при выполнении одной из основных функцио-

нальных задач – контроля и управления тренировкой. На рис. 1.2 показан типовой состав пользователей СОИ ПКУ и их функции. На рис. 1.3 представлены задачи системы отображения информации на ПКУ космических тренажеров согласно ГОСТ 20921–75.

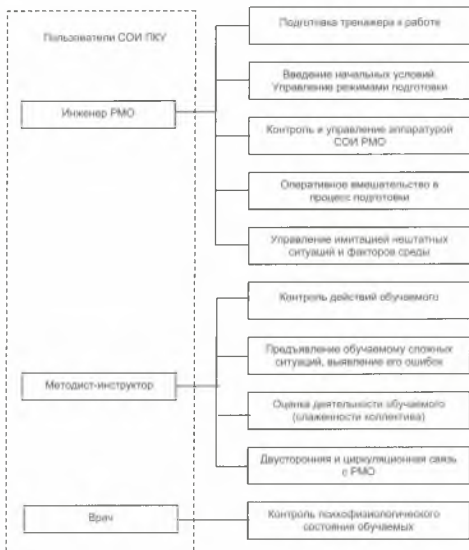


Рис. 1.2. Типовой состав пользователей СОИ ПКУ и их функции

Обучение на тренажере является управляемым процессом, в ходе которого профессиональные характеристики оператора целенаправленно изменяются. Для эффективного контроля и управления процессом проведения тренировки в рамках тренажерного комплекса средства ПКУ обеспечивают реализацию следующих задач:

– планирование и управление процессом обучения (составление расписания тренировок, организация требуемой конфигурации технических и программных средств, организация и поддержка баз данных тренажера, в том числе, начальных условий, нештатных ситуаций, результатов тренировок, данных по экипажам);

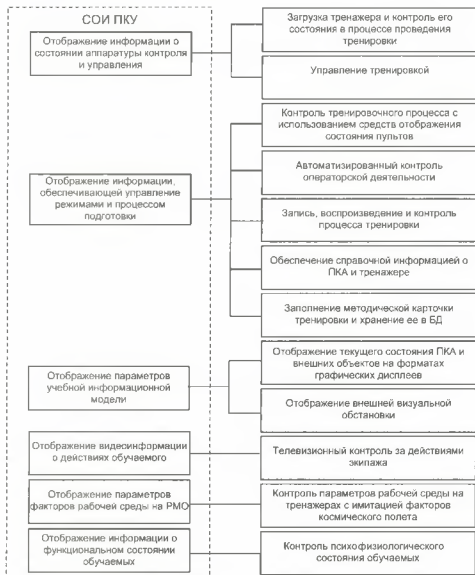


Рис. 1.3. Задачи СОО ПКУ космических тренажеров

- управление функционированием тренажера (подключение и контроль работы систем, загрузка и контроль программ, тестирование систем тренажера);

- непосредственное проведение тренировок (обеспечение контроля действий и состояния операторов, изменение условий тренировки, изменение масштаба времени моделируемых процессов, включение инструктора в контур моделирования, ввод нештатных и аварийных ситуаций и др.).

Существенное значение имеет реализация задач, связанных с расширением методических возможностей тренажера и автоматизацией функций контроля действий экипажа. В числе этих задач: автоматизированная оценка операторской деятельности, регистрация и документирование процесса тренировки и ее результатов для их использования на этапе разбора и при самоподготовке, запись и воспроизведение тренировки, т.е. возможность инструктора остановить тренировку, вернуться в некоторую предыдущую точку моделируемого процесса, запустить автоматическое воспроизведение выполнявшегося ранее задания и прокомментировать допущенные ошибки.

Для работы оперативного персонала, осуществляющего управление тренировками, используются унифицированные модульные пульты контроля и управления. Пульты состоят из секций, на которых располагаются рабочие места инструкторов-методистов, инженеров, врачей, руководителей подготовки. Рабочее место строится как унифицированный комплекс программно-аппаратных средств, основным элементом которого является рабочая станция, имеющая в своем составе средства отображения (монитор) и органы управления (клавиатура, мышь, ручки). Рабочая станция имеет средства для подключения к локальным вычислительным сетям тренажера. В состав ПКУ включаются также индикаторы времени, видеомониторы телевизионного наблюдения за обучаемыми, мониторы, дублирующие

изображения, которые представляются обучаемым, средства связи, оборудование электропитания (источники бесперебойного питания, сетевые фильтры и др.).

Программные средства ПКУ предназначены для реализации интерфейса оперативного персонала тренировки со средствами тренажерного комплекса. Интерфейс инструктора представляет собой совокупность форматов, отображаемых на дисплеях рабочей станции ПКУ. Все разрабатываемые форматы разделяются на две группы: общесистемные форматы и специализированные форматы пользователей.

Общесистемные форматы komponуются вместе с системой и обеспечивают предоставление общей информации о системах или средствах для выполнения типовой операции (ввод начальных условий, команд, пользование средствами службы времени и др.). Форматы пользователя разрабатываются для конкретных прикладных задач (например, для представления информации по некоторой моделируемой системе штатного корабля). Системные средства обеспечивают периодическое обновление информации на этих форматах из модулей, которые генерируют эту информацию в пределах вычислительной сети.

Исходя из приведенного типового состава пользователей, на ПКУ одновременно находится несколько операторов, каждый из которых специализируется на анализе управляемого объекта в определенном аспекте. На основе индивидуальных, частных информационных моделей операторы строят ситуативную адекватную интегральную модель конкретной задачи. Такая интегрально-факторная организация интеллектуального взаимодействия между операторами как на ПКУ тренажера, так и на РМО при комплексных тренировках, значительно расширяет набор факторов и диапазон изменения их значений, при которых система действует эффективно и надежно.

Рассматривая реализацию второй группы функций, необходимо отметить, что взаимная адаптация тренажеров и пользователей отражает согласование априорных и реальных стратегий общения с учетом типологического (профессионального) уровня подготовки пользователей. Учебные информационные модели, информационно-управляющие модели, а также СОИ космических тренажеров разрабатываются с учетом группового уровня адаптации, рассчитанного на следующие основные типологические группы пользователей: обучаемые космонавты, методисты-инструкторы, инженеры, врачи, инженеры-исследователи.

Современные вычислительные системы и системы имитации визуальной обстановки позволяют разрабатывать учебные информационные модели, которые обеспечивают полноту и качество имитации реальных процессов. Методические принципы, положенные в разработку учебных информационных моделей, обеспечивают их адаптивность к уровню подготовки и действиям обучаемых. В ходе проведения тренировок на интеллектуальных тренажерных комплексах состав, темп обновления и структура представления информации соответствуют групповому уровню адаптации и выбранному типу стратегии. Это становится возможным благодаря учету при разработке тренажеров инженерно-психологических принципов подготовки и вывода оперативной информации, которые подробно описаны в работе [28, 29].

Адаптивность современных тренажерных комплексов выражается в том, что они позволяют постепенно увеличивать сложность тренировочных заданий с учетом уровня подготовленности космонавта. Сложившаяся в настоящее время структура тренажеров предполагает проведение автономных тренировок экипажей и многогосегментных тренировок с использованием комплекса тренажеров. Повышение сложности при автономных тренировках

достигается использованием методических приемов. Повышение сложности при комплексных тренировках на тренажерных комплексах при совместном выполнении общих задач обеспечивается интеграцией средств нескольких тренажеров и возможностью их совместной работы.

"Интеллектуальные" возможности тренажерных комплексов для решения многофункциональных задач поддерживаются и развиваются благодаря использованию современной компьютерной техники и информационных технологий:

- за счет увеличения быстродействия и объема памяти современных ПЭВМ, а также использования инструментальных средств программного обеспечения расширяются возможности создания адекватных учебных информационных моделей, функционирующих в режиме реального и изменяемого масштаба времени;

- вводятся дополнительные функции контроля и управления, такие как: автоматизированный контроль операторской деятельности, организация информационно-справочных подсистем, обеспечивающих методистов-инструкторов и инженеров справочной информацией о моделируемом объекте и тренажере, результатах тренировок и др.;

- более полно реализуются инженерно-психологические принципы выбора структуры систем отображения информации, снижающие сложность решения оперативных задач;

- повышаются информационно-технические характеристики систем отображения информации ПКУ за счет использования в качестве основных средств отображения информации цветных мониторов, образующих многооконный интерфейс;

- реализуется возможность речевого информирования методиста-инструктора и инженера о происходящих событиях за счет использования мультимедийных средств;

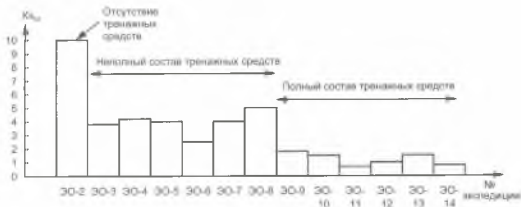


Рис. 1.4. Распределение среднего количества отклонений в действиях экипажей от нормы по экспедициям

– появляется возможность моделировать звуковые эффекты окружающей среды.

Результаты послеполетного анализа деятельности экипажей на орбитальном комплексе "Мир" и Российском сегменте Международной космической станции доказывают, что эффективность работы экипажа на борту орбитального комплекса существенно определяется наличием полноценных тренажерных комплексов для проведения предполетных тренировок экипажей.

Гистограмма на рис. 1.4 показывает усредненное по неделям полета количество ошибочных действий экипажей различных экспедиций на ОК "Мир".

Подготовка первых экипажей, которые выполняли работы на орбитальном комплексе "Мир", осуществлялась преимущественно с использованием штатного оборудования орбитальной станции и ее модулей. Наибольшее количество ошибок зафиксировано у экипажа ЭО-2, при подготовке которого тренажеры не использовались из-за их неготовности.

Для подготовки экспедиций ЭО-3 и ЭО-4 уже использовались учебно-тренировочный макет орбитального комплекса

и специализированный тренажер главного поста управления станции. Перед полетом экспедиции ЭО-5 были введены в эксплуатацию комплексный тренажер ОК "Мир" и комплексный тренажер орбитального модуля "Квант", а перед полетом экспедиции ЭО-9 были введены комплексные тренажеры модулей "Кристалл" и "Квант-2".

Из гистограммы видно, что минимальное количество ошибочных действий экипажей на орбите зафиксировано для экспедиции ЭО-9 и всех последующих. Именно экспедиция ЭО-9 первой прошла полноценную подготовку на тренажном комплексе ОК "Мир".

Таким образом, можно сделать вывод о наличии прямой корреляции между результатами деятельности экипажей в полете (количеством допущенных ошибок), полнотой и возможностями тренажерных средств (наличием тренажерного комплекса или комплекса тренажеров), используемых при их подготовке. Заметим, что использование в наземной подготовке космонавтов полнофункционального тренажерного комплекса приводит к качественно новому уровню готовности экипажей к полету.

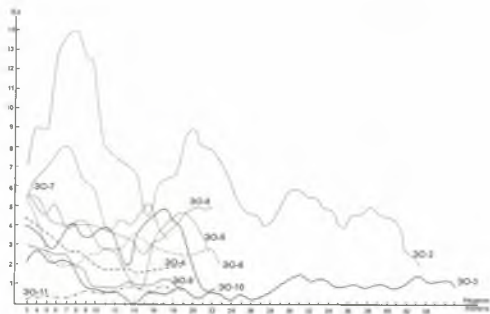


Рис. 1.5. Распределение количества отклонений в действиях экипажей от нормы по неделям полета

На рис. 1.5 представлено распределение количества "отклонений от нормы" Кэ в действиях экипажей по неделям полета. Этот график позволяет оценить, как влияет наличие комплекса тренажеров на изменение периода "вработываемости" экипажей (то есть начального этапа полета на орбитальном комплексе, характеризующегося повышенным уровнем ошибочной деятельности и меньшей эффективностью работы космонавтов). На графике представлено распределение количества ошибочных действий экипажей по неделям космического полета на борту орбитального корабля "Мир" для разных экспедиций. Период "вработываемости" для экипажей, при подготовке которых тренажерный комплекс не использовался или использовался не в полной конфигурации, составляет от 10 до 12 недель. Использование для тренировок экипажей полного комплекса тренажеров позволило сократить этот период до 3–5 недель.

Тренажерный комплекс и комплексные тренажеры Служебного модуля и Функционально-грузового блока Российского сегмента МКС были созданы и сданы в эксплуатацию в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина до выведения на орбиту модулей "Заря" и "Звезда". Это позволило обеспечить всем экипажам полный курс предполетной подготовки на комплексных тренажерах Российского сегмента. Анализ послеполетной деятельности первых экспедиций космонавтов и астронавтов на МКС показал, что эффективность работы экипажей на борту Российского сегмента МКС была достаточно высокой, а уровень ошибочных действий и период "вработываемости" соответствовали аналогичным показателям для последних экспедиций на орбитальном комплексе "Мир", несмотря на то, что экипажи впервые работали на новой космической станции.

1.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Создание тренажеров для подготовки операторов к профессиональной деятельности в различных областях техники регламентируется ГОСТами, отраслевыми стандартами, техническими требованиями и другими документами, в которых, как правило, отражается классификация разрабатываемых тренажеров по назначению и способам технического построения.

Например, в авиации в соответствии с принятой классификацией технических средств подготовки и обучения авиационных специалистов [21] выделяется пять классов тренажеров:

- процедурные;
- специализированные;
- комплексные;
- оперативно-тактические;
- тренажерные комплексы.

Специализированные тренажеры предназначены для формирования у операторов полного набора умений и навыков по одному из видов деятельности: выполнению отдельных этапов работы, решению отдельных задач программы (например, ручная стыковка ПКА), либо в объеме профессиональных обязанностей одного из членов экипажа.

Комплексные тренажеры предназначены для подготовки операторов в полном объеме их функциональных обязанностей, включая отработку взаимодействия между собой в составе экипажа и с другими взаимодействующими коллективами операторов.

Под процедурным тренажером понимается средство обеспечения профессиональной подготовки "по эксплуатации отдельных систем либо к выполнению отдельных элементов деятельности". Таким образом, процедурные тренажеры отличаются от специализированных только объемом моделируемых функций и используемого оборудования. Поэтому в документах Федерального авиационного агентства США, определяющих норма-

тивно-правовую базу авиационного тренажеростроения, аналоги процедурных тренажеров в отдельный класс не выделяются.

Под тренажерным комплексом понимается "совокупность информационно и технически взаимосвязанных технических средств подготовки операторов, объединенных единым дидактическим замыслом в интересах повышения эффективности профессиональной подготовки авиационных специалистов". Такая трактовка понятия тренажерный комплекс, на наш взгляд, не в полной мере раскрывает возможности интеграции тренажных средств: тренажерный комплекс – это не просто совокупность взаимосвязанных тренажеров.

В настоящей монографии тренажерный комплекс трактуется как система, реализующая новую технологию создания, эксплуатации и развития технических средств подготовки операторов, в соответствии с которой, в частности, общесистемные функции изымаются из состава тренажера и реализуются как системы коллективного пользования в составе инфраструктуры тренажерного комплекса.

С учетом указанных замечаний и принимая во внимание опыт координации работ в рамках комплексной научно-технической программы "Модульные тренажеры", выполнявшейся вузами России, нами предлагается схема классификации тренажных средств, приведенная на рис. 1.6 (см. цветную вкладку).

Эта схема учитывает различие тренажеров прежде всего по назначению и области применения. С этой точки зрения принято выделять в отдельные группы авиационные (для пилотов самолетов и вертолетов), космические, морские (для надводных судов и подводных лодок), автомобильные, железнодорожные тренажеры, тренажеры для персонала атомных электростанций и т.д. В каждой из этих областей применения на базе тренажеров формируются навыки и умения выполнения характерных для данной сферы деятельности операций управления. Для имитации окружающей среды ис-

пользуются соответствующее оборудование, специфические органы контроля и управления.

В зависимости от характера деятельности оператора и относительной важности сенсомоторной компоненты в действиях оператора можно выделить так называемые ситуационные тренажеры и тренажеры по управлению объектами. В ситуационных тренажерах основная задача оператора (например, диспетчера системы управления воздушным движением или специалиста, выполняющего поиск и устранение неисправности) состоит в анализе ситуации, выявлении критических отклонений от нормальной работы системы и выборе решений, обеспечивающих ее безопасное правильное функционирование. В качестве инструментальных средств в таких тренажерах часто используются системы распознавания, экспертные системы, системы, построенные на основе теории принятия решений. Моторная компонента здесь играет второстепенную роль. В тренажерах по управлению объектами (например, космическим кораблем при стыковке или самолетом при посадке) основное значение имеют своевременная двигательная реакция и доведенные до автоматизма навыки работы с органами управления.

Вводя признак классификации по видам подготовки, делается акцент на самостоятельное рассмотрение трех уровней (этапов) профессиональной практической подготовки операторов.

К первому уровню отнесем технические средства начальной (предтренажной) подготовки и обучения операторов. Таими средствами являются учебно-тренировочные стенды, компьютерные тренажеры и тренажеры на базе систем виртуальной реальности.

Учебно-тренировочные стенды создаются для обеспечения теоретической и начальной практической подготовки операторов по эксплуатации отдельных систем. В отличие от учебных компьютерных программ, они, как правило, строятся на основе физических макетов отдельных пультов и органов управления. Эти маке-

ты размещаются вне конструктива кабины, обычно в учебных классах, что позволяет предъявить обучаемому не только лицевые панели, но и внутреннее устройство оборудования. Это отличает их от специализированных тренажеров. Макеты пультов (или штатные пульта) подключаются к компьютерной моделирующей системе, позволяя имитировать их штатную логику работы в составе реального объекта.

Для демонстрации взаимодействия изучаемой системы с другими системами объекта могут создаваться дисплейные графические форматы, отображающие работу этих взаимодействующих систем. Таким образом, обучаемый получает возможность не только изучить логику работы системы, познакомиться с устройством ее оборудования, используя компьютерную графику и физические макеты, но и получить навыки управления отдельной системой.

Компьютерные тренажеры создаются для первичной подготовки операторов по управлению отдельными системами, группами систем или объектом в целом. Органы управления и сигнализации в таких тренажерах представлены их графическими компьютерными образами с возможностью использования компьютерных манипуляторов различного вида. Вместе с тем, они могут предлагать полноценную методическую поддержку практических занятий, включая выделенные компьютерные рабочие места преподавателей, средства подготовки упражнений, регистрации, оценки и анализа действий обучаемых. Наиболее развитые многофункциональные компьютерные тренажеры могут, в частности, обеспечить работу операторов в составе экипажа.

Компьютерные тренажеры не обеспечивают адекватную имитацию воздействий на органы чувств и не позволяют привить обучаемым моторные навыки управления реальным объектом. Их основные достоинства – малая стоимость, относительно короткие сроки разработки и легкость тиражирования. Помимо использования в качестве средства предтре-

нажной подготовки, они могут применяться как полноценные тренажеры там, где привитие моторных навыков управления объектом не требуется (например, тренажеры технического обслуживания в некоторых областях человеческой деятельности). Компьютерные тренажеры также используются как средство самоподготовки обучаемых.

В отдельную группу выделены компьютерные тренажеры на базе систем виртуальной реальности. В отличие от предыдущей группы, они используют современные технологии для воздействия на органы чувств операторов и имитации их виртуального (кажущегося) присутствия в управляемом объекте. В частности, они позволяют предъявлять обучаемому трехмерную графическую интерактивную модель интерьера объекта со всеми его блоками, системами, пультами и пр. Объединение графической модели объекта с математической системой моделирования позволяет оператору почти полноценно работать с виртуальным оборудованием управляемого объекта.

Как и обычные компьютерные тренажеры, тренажеры с использованием систем виртуальной реальности пока не позволяют прививать оператору моторные навыки управления объектом, поэтому они также отнесены к предтренажным средствам подготовки. Вместе с тем, они предоставляют такие возможности, которые трудно или невозможно реализовать на тренажерах с использованием физических учебно-тренировочных макетов. Например, они позволяют наглядно имитировать возникновение и распространение пожара в герметичном объеме подводной лодки или космического аппарата, что дает возможность проводить тренировки по обеспечению живучести управляемого объекта.

Таким образом, тренировочные средства первого уровня позволяют проводить предтренажную подготовку обучаемых по отдельным системам, задачам и объекту в целом, давая возможность высвобождать дорогостоящее время на полномасштабных тренажерах и увеличивать общую про-

пускную способность учебного центра.

Второй уровень тренажной системы подготовки операторов образует стационарная тренажерная база учебного центра. К ней относятся специализированные и комплексные тренажеры с рабочими местами операторов, реализованными на основе физических учебно-тренировочных макетов реального объекта или его частей (отсеков). Эти тренажеры могут быть построены как автономные, так и спроектированы в рамках технологии тренажерного комплекса, как это описывается в настоящей монографии.

Назначение специализированных и комплексных тренажеров в рамках рассматриваемой схемы остается таким же, как это определено выше. При том условии, что обучаемые проходят глубокую подготовку на предтренажных учебно-тренировочных средствах, полномасштабные тренажеры могут эффективно использоваться для приобретения и закрепления моторных навыков управления объектами и для проведения комплексных тренировок.

К третьему уровню тренажной системы подготовки отнесены мобильные тренажеры поддержания и восстановления навыков управления объектом.

Очевидно, что операторы, прошедшие подготовку в учебном центре, в дальнейшем далеко не всегда имеют доступ к его тренажерам. При этом в ходе выполнения их профессиональных обязанностей часть навыков может быть не востребована в течение длительного времени, но будет необходима на очередном этапе выполнения работ. Такие навыки нуждаются в поддержании и восстановлении. Следовательно, необходимы тренажеры, которые могли бы эксплуатироваться вне учебного центра, например, в мобильных воинских частях. Такие средства названы мобильными наземными тренажерами.

Эти тренажеры могут иметь ограниченную функциональность в части учебно-методической поддержки только наиболее важных навыков управления объектом. Основным требованием к ним является мобильность. Мобильные тренажеры

должны допускать их быструю сборку/разборку обслуживающим персоналом и возможность перемещения на новое место дислокации. Для этого проектируются облегченные конструктивные рабочие места операторов, разборные облегченные системы имитации визуальной обстановки и т.д.

Другим классом мобильных тренажеров являются тренажеры бортовые, т.е. размещаемые на борту управляемого объекта. Потребность в них возникает при длительном нахождении операторов вдали от базы с наземными тренажерами. Например, в ходе выполнения длительного космического полета на орбитальной станции космонавты в значительной степени теряют навыки управления транспортным кораблем, на котором им предстоит спускаться на Землю, и это представляет собой большую проблему. Решение проблемы – размещение мобильного тренажера транспортного корабля на борту орбитального комплекса.

Бортовые тренажеры должны быть намного компактнее и легче наземных мобильных тренажеров. Для выполнения этого требования они проектируются с максимальным использованием имеющегося на борту штатного оборудования: бортовых вычислительных средств, штатных органов управления и отображения.

По способу сопряжения средств тренажера с внешними системами, в том числе с системами реальных объектов, службами, центрами обеспечения и другими тренажерами, тренажерные средства делятся на встроенные тренажеры, тренажеры-приставки, автономные тренажеры и комплексы. Встроенный тренажер органически входит в состав аппаратуры штатного объекта, являясь одним из его узлов. Тренажер-приставка выполняется в виде отдельного модуля, который при необходимости может подключаться к основному комплексу аппаратуры объекта и работает совместно с этой аппаратурой.

Наиболее распространены автономные тренажеры. Они имеют в своем составе полный набор устройств, достаточный для проведения тренировочного про-

цесса и оценки его результатов. Взаимодействие с внешней средой имитируется средствами самого тренажера.

Разрабатываемые различными организациями тренажеры существенно отличаются и способом технической реализации как тренажера в целом, так и способами построения его подсистем и узлов. Например, вычислительная система тренажера может создаваться как одноплатинный вычислительный комплекс либо в виде локальной вычислительной сети, либо на основе распределенной вычислительной сети. Система управления тренировками может строиться на базе использования терминальных устройств вычислительного комплекса, на базе специализированных или универсальных пультов контроля и управления.

Технические и программные средства системы управления тренировками могут обеспечивать различный уровень сервиса, документирования, автоматизации оценки качества операторской деятельности. Последние годы развивается направление в создании адаптивных тренажеров, в которых предусматриваются средства автоматизации планирования уровня сложности упражнений и последующего хода тренировки в зависимости от степени усвоения необходимых навыков.

В зависимости от способа имитации взаимодействия управляемого объекта с внешней средой можно выделить следующие варианты построения тренажера:

а) на базе физического моделирования объектов внешней среды: использование подвижных физических макетов (например, звездной сферы, стыкуемого космического корабля, самолета противника, посадочной полосы), кино- и фотонесителей, каналов телефонной и радиосвязи;

б) на базе математического моделирования объектов внешней обстановки (при этом моделируется не только логика работы соответствующего объекта, но и изменение внешнего вида этого объекта).

Важное значение имеет способ реализации рабочей среды, в которой работает оператор. Например, один из вариантов

построения рабочего места оператора состоит в использовании реального оборудования, снимаемого со штатного объекта и размещаемого в учебном классе. Это реальное оборудование сопрягается с вычислительным комплексом, на основе которого осуществляется моделирование перемещения объекта и имитация внешней обстановки. Такие тренажеры находили широкое применение, в частности, в морском флоте. Их недостатком является сложность моделирования множества нештатных ситуаций и отказов оборудования.

Другим вариантом построения рабочей зоны оператора является использование макетов рабочих мест обучаемых, в которых воспроизводится среда, идентичная рабочей зоне штатного объекта. Пульты и органы управления объектом используются такие же, как на реальном объекте, с аналогичным расположением индикаторных устройств, шкал приборов контроля и органов управления. Таким образом, они по внешнему виду подобны реальным, но работа систем объекта полностью моделируется средствами вычислительного комплекса. Это наиболее распространенный тип тренажеров. Такие тренажеры отличаются (при корректном построении моделей динамики и бортовых систем) высоким уровнем подобия и обладают широкими функциональными возможностями.

В свою очередь, по типу оборудования, используемого в рабочих местах оператора, можно выделить тренажеры, в которых применяются пульты, органы управления и контроля в штатном исполнении (т.е. такие же, как в реальном объекте), и тренажеры, в которых указанное оборудование выполнено в тренажном исполнении (т.е. здесь соблюдается лишь внешнее подобие, а схемная часть реализуется применительно к задачам тренажера). В этом случае приборы и органы управления обычно непосредственно сопрягаются с вычислительным комплексом, а логика работы приборов и пультов моделируется программными средствами. Такое

решение позволяет более полно имитировать отказы и различные состояния оборудования рабочего места оператора.

Тренажеры можно классифицировать также по признаку наличия или отсутствия каналов имитации тех или иных факторов, воздействующих на органы чувств человека. Человек воспринимает информацию о внешней среде и идентифицирует ситуацию с помощью зрительного, звукового, тактильного анализаторов, посредством мышечных и акселерационных ощущений. Зрительный и звуковой каналы являются основными каналами восприятия информации человеком. Поэтому в большинстве тренажеров визуальную и акустическую обстановку стремятся воспроизводить в возможно более полной мере.

Необходимость имитации мышечной нагрузки возникает при силовом воздействии на органы управления (рычаг, колонка, штурвал, педаль), особенно если усилие должно изменяться в зависимости от моделируемых режимов и внешних условий. Для того, чтобы повысить степень подобия реального объекта и тренажера в этом случае часто в состав тренажера вводят систему загрузки исполнительных органов управляемого объекта.

В зависимости от того, моделируются или нет на тренажерах акселерационные ощущения, они делятся на статические и динамические. В статических тренажерах рабочее место оператора устанавливается неподвижно. В динамических тренажерах рабочее место оператора устанавливается на подвижную (вибрационную) платформу или центрифугу, которые управляются таким образом, чтобы возникающие при этом линейные и угловые ускорения, а также перегрузки в моделируемых ситуациях были такими же, как в штатном объекте.

Предложенная схема классификации тренажеров, конечно, не может считаться полной. Однако авторы считают, что ее можно принять как логическую основу для разработки государственных и отраслевых стандартов в области тренажеростроения.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

2.1. ТРЕНАЖЕР КАК МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС И ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА

Основное назначение тренажера состоит в привитии операторам умений и навыков по управлению соответствующим объектом в реальных условиях. В идеале, перейдя с тренажера на реальный объект, оператор должен почувствовать себя в привычной обстановке. Для этого на тренажере должны иметься такие же органы управления, какие имеются на реальном объекте, а на органы чувств оператора должна поступать такая же информация, которая поступает в реальных условиях его деятельности. Поэтому, с одной стороны, любой тренажер – это прежде всего моделирующий комплекс, который воспроизводит условия работы оператора (или экипажа) на реальном объекте. С этой точки зрения тренажер является аналогом или моделью управляемого объекта, причем имитация поведения и свойств объекта должна производиться в объеме тех задач, которые решаются на реальном объекте.

С другой стороны, тренажер – это система обучения. В процессе тренировки оператора на тренажере следует осуществлять управление моделируемой ситуацией, контролировать правильность и эффективность его действий, планировать последовательность и сложность выполняемых оператором задач с учетом закономерностей формирования знаний, умений и навыков.

Следовательно, тренажер объединяет в себе систему моделирования и систему обучения. В любом тренажере присутст-

вуют два контура: контур моделирования и контур управления обучением (рис. 2.1).

Контур обучения является внешним по отношению к контуру моделирования. В контуре моделирования один из каналов обратной связи обеспечивает моделирование режимов автоматического управления объектом; второй канал обратной связи, который замыкается через оператора, обеспечивает моделирование режима ручного управления объектом.

В контуре управления обучением управляющие воздействия формируются с использованием средств системы управления тренировкой (СУТ) инструктором (или инструкторской бригадой), который на основе информации о работе модели реального объекта и выполнении задач оператором (экипажем) изменяет условия работы этой модели, задает внешние возмущения, вводит команды для осуществления моделирования тех или иных отказов в работе систем объекта. При высоком уровне автоматизации оценки действий обучаемых и самого процесса управления обучением возможно автоматическое управление изменением условий функционирования объекта и сложности обрабатываемой на тренажере задачи (т.е. без участия инструктора) в зависимости от эффективности и правильности выполняемых экипажем задач и фиксируемого системой уровня навыков и умений экипажа.

Рассмотрим более подробно задачу построения модели управляемого операторами объекта. Построение контура моделирования, безусловно, определяется спецификой реального объекта, к управлению которым готовится оператор. Од-

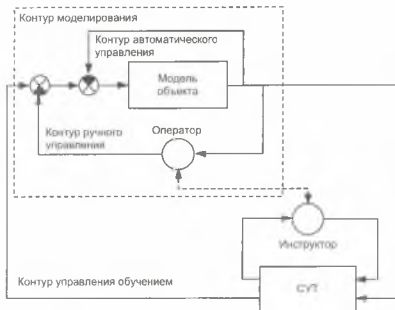


Рис. 2.1. Тренажер как моделирующий комплекс и обучающая система

нако независимо от отработываемых на тренажере задач, состава систем объекта, его структуры и используемых средств управления в каждом реальном объекте можно выделить однотипные системы. На рис. 2.2 представлена структура взаимодействия оператора с окружающей средой, содержащая следующие типовые системы.

1. Собственно управляемый объект, как физическая система тел, включающая в себя корпус объекта и элементы его интерьера, адекватно отображающие область пространства, в которой осуществляет свою деятельность оператор (или экипаж). В дальнейшем эту компоненту модели будем называть учебно-тренировочным макетом (УТМ) управляемого объекта или рабочим местом оператора (РМО).

2. Функциональные системы объекта, которые определяют его поведение во времени. Тренажер создается для отработки навыков управления и эксплуатации именно этих систем.

3. Внутренняя среда объекта – освещение, температура, давление, дополнительные конструктивные элементы.



Рис. 2.2. Структура взаимодействия оператора с окружающей средой

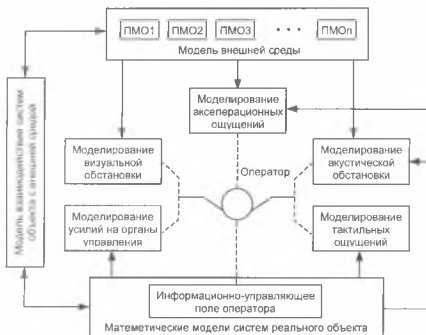


Рис. 2.3. Структура системы моделирования реального объекта

4. Внешняя среда, которая оказывает влияние на функционирование объекта и с которой взаимодействует управляемый объект.

Все указанные системы, как показано на рис. 2.2, связаны друг с другом. Приведенная структура управляемого объекта может служить в качестве первого приближения для ответа на вопрос: что необходимо моделировать при создании моделирующего комплекса тренажера.

Для полной имитации условий работы оператора на реальном объекте необходимо воспроизводить соответствующий объем поступающей человеку информации, а также возникающие у него ощущения. На основании этого представим структуру системы моделирования реального объекта в виде, показанном на рис. 2.3.

Информационно-управляющее поле оператора в РМО представляет собой комплекс средств визуального контроля и управления (приборы, кнопки, переключ-

атели, мониторы бортовых вычислительных систем и др.), которые используются им в процессе работы на реальном объекте.

Работа бортовых систем и оборудования реального объекта на тренажере воспроизводится на основе их математических моделей. Как правило, состав и структура этих моделей определяется иерархической структурой систем, подсистем и узлов реального объекта и информационными связями между ними.

Математическая модель внешней среды должна включать в себя программные модели тех объектов и процессов, которые оказывают влияние на работу объекта, например, внешние пункты управления, внешние объекты сил и средств содействия или противодействия.

При необходимости в состав математической модели реального объекта целесообразно включать модели взаимодействия среды с оператором и с системами управляемого объекта. В частности, в со-

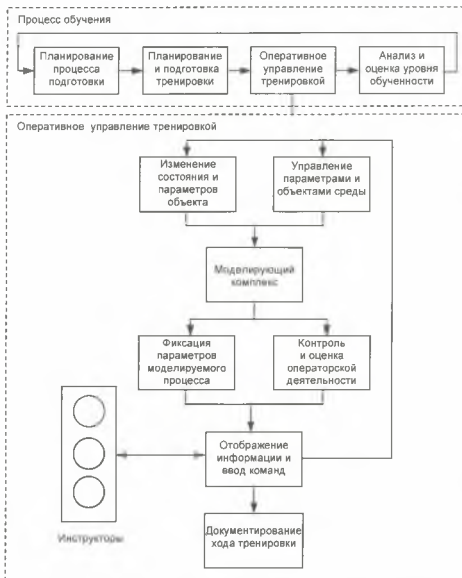


Рис. 2.4. Функциональная структура контура управления обучением

став модели взаимодействия систем управляемого объекта со средой могут входить модели динамики движения моделируемых тел в пространстве, модели обнаружения внешних объектов системами управляемого объекта и др.

Использование средств имитации внешней среды в тренажере во многом

зависит от уровня требований к полноте имитации факторов реальной деятельности оператора. Те факторы среды, которые воздействуют на оператора, должны воспроизводиться в тренажере с использованием соответствующих моделей (см. рис. 2.3). Для большинства приложений обязательным является моделирование

визуальной обстановки, наблюдаемой операторами. Как правило, моделируется акустическая обстановка (звуковой канал имитации должен воспроизводить шумы работающей аппаратуры, звуковую сигнализацию и акустические шумы объектов внешней среды).

Несколько реже (ввиду их сложности) в тренажерах реализуют моделирование акселерационных ощущений. Использование этих моделей необходимо в тех случаях, когда оператор в процессе управления объектом подвергается воздействию больших ускорений, вибраций или трясок.

Если в процессе управления реальным объектом оператор использует рычаги управления и педали (рулевые колонки, штурвалы, рычаги переключения и др.), то средствами тренажера целесообразно моделировать мышечные усилия, связанные с воздействиями на органы управления.

В некоторых случаях разработчик тренажера должен также решать задачу моделирования тактильных ощущений.

Все указанные модели взаимосвязаны и в процессе проведения тренировки должны воспроизводиться в реальном масштабе времени.

Построение комплекса управления тренировкой осуществляется на основе квалифицированного использования закономерностей, которые определяют формирование знаний, умений и навыков операторов. Функциональная структура контура управления обучением приведена на рис 2.4. Замкнутый процесс совершенствования умений и навыков оператора, необходимых ему для управления объектом, формируется на основе последовательного выполнения этапов планирования процесса подготовки, определения последовательности, стратегии и порядка проведения конкретных тренировок, собственно проведения тренировок и анализа их результатов. На основе анализа результатов серии тренировок производится оценка уровня обученности оператора и

осуществляется корректировка последующего процесса обучения.

При построении комплекса управления тренировкой в тренажере наиболее важной является реализация функции оперативного управления тренировкой. В этих целях в состав тренажера необходимо включить программные средства, которые должны обеспечивать фиксацию и отображение инструкторской бригаде действий обучаемых и параметров моделируемых процессов, ввод команд, связанных с заданием начальных условий, изменением состояния и параметров моделируемого объекта и внешней среды, а также автоматизированный контроль правильности и эффективности действий операторов.

На рис. 2.5 представлен состав моделей, разрабатываемых в процессе создания тренажера. Контур моделирования объекта реализуется на основе моделей реального объекта, среды и оператора. Обучаемый оператор (или группа операторов – экипаж) совместно с моделируемыми системами объекта и объектами внешней среды образуют человеко-машинную систему, которая характеризуется сложным поведением. В процессе создания методического обеспечения подготовки операторов на тренажере инструкторы-методисты формируют модель процесса проведения тренировки, обеспечивающую разбиение упражнения на отдельные этапы и целенаправленное поведение человеко-машинной системы на каждом из этапов в соответствии с установленными для этого этапа целями.

Модель оператора на рис. 2.5 можно рассматривать, во-первых, как аппарат (средство) для анализа физиологических возможностей человека и, во-вторых, как модель управляющего звена, обеспечивающего целенаправленное поведение человеко-машинной системы.

Моделирование процесса восприятия, обработки, хранения информации человеком, оценки ситуации и процесса

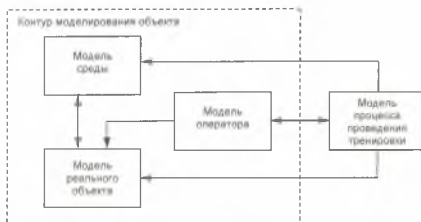


Рис. 2.5. Состав моделей, используемых в процессе создания тренажера

принятия решений представляет собой достаточно сложную задачу. Создать такую модель применительно к множеству задач управления сложным динамическим объектом в полном объеме практически не удастся. В то же время, при решении некоторых задач без создания модели оператора невозможно воспроизводить ситуации, адекватные реальным. В частности, модель поведения оператора необходима, когда требуется воспроизводить поведение людей, реально отсутствующих в процессе проведения тренировки (других членов экипажа, операторов, которые управляют другими объектами внешней среды, особенно если их поведение зависит от действий обучаемого оператора).

Человек-оператор в ряде случаев является составной частью моделируемой на тренажере системы. Например, в космических тренажерах модели систем терморегулирования, обеспечения газового состава, шлюзования отходов включают модели соответствующих функций человека (в частности, потребление кислорода, изменение при дыхании содержания углекислого газа и др.).

Известные модели восприятия информации используются при построении систем имитации факторов внешней среды. Технические характеристики этих

систем определяются с учетом особенностей и характеристик зрительного, слухового анализатора, средств восприятия акселерационных, тактильных ощущений и механических усилий.

Одним из важнейших параметров, связанных с работой человека-оператора в контуре управления, является время его реакции на поступление различной информации. С этой точки зрения схема обработки информации человеком-оператором может рассматриваться [77] в рамках пяти основных функций (рис. 2.6):

Функция вида 1 – *"Восприятие информации в чистом виде"*. Информация приходит из внешнего мира, сужается в сенсорной области и заканчивает свой путь в сознании. Воспринятая информация не является причиной каких-либо немедленных действий, она лишь накапливается в памяти человека-оператора.

Функция вида 2 – *"Действие в чистом виде"*. Информация исходит из сознания (точнее говоря, она порождается запомненной ранее информацией) и воздействует через моторную область и эффе́кторы (мышцы, железы и т.д.) на внешний мир.

Функция вида 3 – *"Неосознанная реакция"*. Информация приходит из внешнего мира, однако она не попадает в созна-

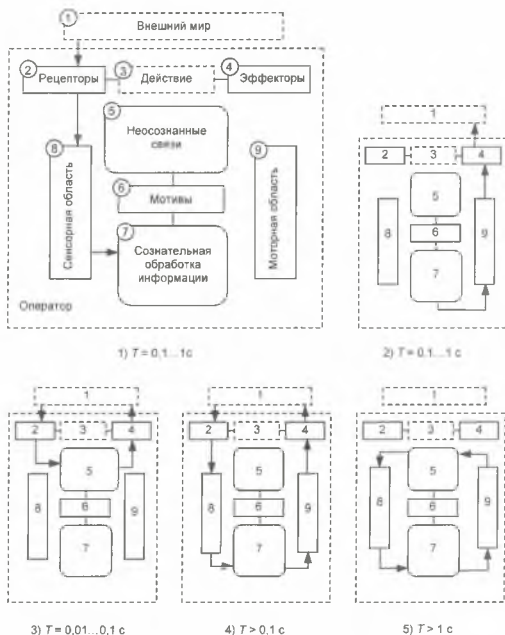


Рис. 2.6. Схемы обработки информации человеком-оператором

ние человека-оператора, а соответствующее воздействие на внешний мир (например, глазные рефлексы) формируются в рамках контура, не контролируемого сознанием.

Функция вида 4 – "Осознанная реакция". Информация приходит из внешнего мира, проникает через сенсорную область в сознание человека-оператора и сопоставляется там с мотивами, после чего че-

рез моторную область осуществляется соответствующее воздействие на внешний мир.

Функция вида 5 – "Рефлексия". Информация не приходит из внешнего мира и не кончается в нем. Она циркулирует в замкнутом контуре: сенсорная область, сознание, моторная область, неосознанные связи, сенсорная область и т.д.

Время выполнения отдельных операций, в которых участвует сознание, составляет немногим более 0,1 с [77]. Бессознательные реакции (например, невольное зажмуривание глаз в момент опасности) протекают значительно быстрее. Так, для простого рефлексa (например, движение руки, ноги) время реакции человека может составлять 15...20 мс, а для более сложного (например, акустико-моторного) рефлексa 200...300 мс.

С учетом указанных параметров, при построении тренажера время передачи информации по каналу ввода команд от оператора в модель следует ограничивать величиной 100 мс, а обновление информации на приборах наблюдения рекомендуется производить с периодом 1 с.

Для построения модели процесса проведения тренировки желательно иметь описание поведения человекомашинной системы. Так как эта система отличается широкой вариацией программ поведения, высоким уровнем неопределенности параметров внешней среды и изменением в процессе работы частных целей выполнения отдельных задач, то по отношению к ней можно применять подходы, принятые при анализе автономных интеллектуальных систем. В зависимости от уровня сложности выполняемой оператором (экипажем) задачи выделим следующие уровни поведения системы, реализуемой в рамках моделирующего комплекса тренажера [128].

1. Стандартное (стереотипное) поведение. Этот уровень характерен тем, что для любого возможного исходного состояния системы $q_i \in Q$ однозначно известна цель $p_j \in P$ и порядок выполнения задачи (программа реагирования) $r_q \in R$.

2. Поведение с самостоятельным выбором варианта r_q реализации поставленной задачи, из числа тех, которые рассматривались или отработывались на предыдущих этапах обучения.

3. Поведение на основе логических рассуждений с ограничениями, которые регламентируются инструкторами на основе формализованных правил и инструкций. Для этого уровня поведения характерным является многошаговый процесс поиска программы реагирования r_q (из заранее известного множества R) на основе использования имеющихся у оператора знаний и рассуждений.

4. Рациональное поведение, обусловленное опытом. При этом реакция r_q на возникающую ситуацию формируется обучаемым в процессе выполнения поставленной задачи с учетом опыта, накопленного при выполнении предыдущих упражнений. Некоторые реакции могут носить неосознанный характер.

5. Интуитивное поведение. Для этого уровня поведения характерно существенное расширение состава ранее неизвестных задач (ситуаций), более высокий уровень неопределенности во внешней среде и самостоятельная корректировка экипажем целей, которые необходимо достичь. При формировании реакции здесь используются и знания, и опыт, и интуиция.

Данное представление моделей может эффективно использоваться при решении задачи автоматизации контроля и управления процессом тренировки и выборе методов оценки операторской деятельности (см. гл. 6).

2.2. МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ОБЪЕКТА И СРЕДЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ ТРЕНАЖЕРА

Создание корректных и эффективных моделей реальных объектов является одной из самых сложных задач, связанных с разработкой тренажеров. Следует иметь в виду, что первоначально разрабо-

танная модель реального объекта редко совпадает с численной моделью, которая реализуется в тренажере. Это связано с необходимостью уточнения описания объекта и выбора рационального уровня глубины моделирования систем управляемого объекта и процессов во внешней среде.

Модель условий реальной деятельности оператора можно представить в виде совокупности двух взаимодействующих систем: модели управляемого объекта M и модели внешней среды E . В свою очередь, модель управляемого объекта включает в себя модель динамики движения объекта и модели его основных систем (бортовых систем).

Исходя из классификации моделей, предложенной в [128], применительно к использованию в тренажерах комплекс моделей динамики и систем управляемого объекта совместно с оператором следует рассматривать либо как динамическую управляемую систему CS , либо как адаптивную управляемую систему AS , либо как интеллектуальную систему IS .

Представление модели объекта в виде динамической управляемой системы (CS) целесообразно в том случае, когда алгоритм формирования управляющего воздействия $u \in U$, связанный с реагированием на воздействие внешней среды, достаточно четко определен в соответствии с заданной целью выполняемой операции. Такая модель определяется следующим образом: $S = \langle X, F, T \rangle$, где T – время (мировое, системное время или время тренировки); X – вектор параметров, определяющих состояние системы; $F = F(x, u, v, t)$ – правило определения текущего состояния системы по состояниям в предыдущие моменты времени (управление $u \in U$, время $t \in T$, внешнее возмущение $v \in V$, где V – множество возможных возмущений). Правило F при моделировании непрерывных систем представляет их описание в форме дифференциальных уравнений и отношений

между множествами переменных.

Адаптивная управляемая система AS отличается наличием множества целей управления $p_i \in P$ [128]. Описание этой системы должно включать в себя правило $\Psi = \Psi(p, t)$, $p \in P$, $t \in T$, которое определяет механизм модификации правила определения текущего состояния системы в зависимости от установленной цели управления.

Интеллектуальные системы (IS) отличаются наличием механизма целеполагания Λ , который состоит в формировании новых целей в соответствии с возникающими ситуациями. При моделировании таких систем необходимо формулировать правило порождения целей $\Omega(x, u, v, p, t)$.

В табл. 2.1 приведено в качестве примера формальное определение математической модели класса IS (системы $S = \langle X, F, \Omega, W \rangle$).

Аналогично представляются модели других видов систем.

С учетом классификации, предложенной в [128], при моделировании внешней среды удобно выделить следующие виды среды:

- DE – регулярная среда, в которой изменении параметров, влияющих на управляемый объект, носит детерминированный характер;

- VE – внешняя среда с неопределенными факторами, воздействие которых на управляемый объект априори не известно (носит случайный характер);

- RE – реагирующая среда, характеристики которой изменяются в зависимости от действий управляемого объекта;

- AE – адаптивная среда, в которой имеются объекты, обладающие собственными интересами, логика поведения которых активно и целенаправленно изменяется с учетом действий управляемого объекта.

В табл. 2.2 приведено определение математической модели совместного функционирования управляемого объекта и среды [128].

2.1 Определение математической модели системы класса IS

№ п/п	Наименование объекта	Обозначение	Примечание
1	Набор параметров системы	$X = \{X_i\}, i = 1, 2, \dots, n$	Набор множеств с определенными на них отношениями
	1.1 Фазовое пространство системы	$X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$	
	1.2 Фазовые состояния (фазовый вектор) данной системы	$x = (x_1, \dots, x_n)$	$x \in X$
	1.3 Фазовые переменные (фазовые координаты) данной системы	$x_1, \dots, x_n$	$x_1 \in X_1, x_n \in X_n$
	1.4 Область допустимых значений фазовых состояний системы	$X \subseteq X'$	X' – множество допустимых состояний системы
	1.5 Неконтролируемые возмущения	$v \in V$	V – множество неконтролируемых возмущений
	1.6 Управляющее воздействие	$u \in U$	U – область управляющих воздействий
	1.7 Цель управления системы	$p \in P$	P – множество целей управления данной системы
2	1.8 Руководство для целеполагания	Λ	Множество мотивов, ценностей и т.д.
	Набор рескриптов системы	$F = \{F_j\}, j = 1, 2, \dots$	Набор преобразований всех видов: отображения, алгоритмы, процедуры вывода и т.д.
	2.1. Правило определения текущего состояния системы по состояниям во все предыдущие моменты	$F = F(x, v, u, t)$	$x \in X, t \in T, v \in V, u \in U$
	2.2. Механизм модификации правила определения состояния системы	$\Psi = \Psi(p, t)$	$p \in P, t \in T$ Механизм описывает способы модификации правила F
	2.3. Правило порождения целей	$\Omega = \Omega(x, v, u, p, t)$	$p \in P$
3	Часы системы	$W = (T_s, E_c)$	Состоит из множеств: системное время и механизм активности
4	Системное время	$T_s \in T$	Множество моментов времени функционирования системы
5	Мировое время	$T, t_i \leq t_{i+1}$	Множество всех возможных моментов времени, наделенных структурой линейного порядка $t_i \leq t_{i+1}$
6	Механизм активности системы часов	E_c	Тактовый генератор системы, запускающий часы системы

2.2. Определение математической модели функционирования объекта и среды

№ п/п	Наименование объекта	Обозначение	Примечание
1	Момент времени начала функционирования процесса системы и среды	$t_e \in T$	
2	Момент времени завершения функционирования процесса системы и среды	$t_k \in T$	
3	Интервал времени, в течении которого реализуется процесс	$[t_0, t_k]$	$t_0 \in T, t_k \in T$
4	Начальное состояние системы	$x_0 = x(t_0)$	$t_0 \in T, t_k \in T$
5	Начальное состояние среды	$q_0 = q(t_0)$	$t_0 \in T, t_k \in T$
6	Фазовая траектория системы	$\{x(t), t, \cdot\}$	$t_i \in T, t_k \in T$ Последовательность упорядоченных пар состояния системы в момент времени t и момент времени t_i
7	Фазовая траектория среды	$\{q(t), t, \cdot\}$	$t_i \in T, t_k \in T$ Последовательность упорядоченных пар состояния среды в момент времени t и момент времени t_i
8	Определение ситуации	$\lambda(t_i) = \langle x(t_i), q(t_i) \rangle$	$\lambda(t_i) \in R, t_i \in T$ Пара, состоящая из состояния системы S и состояния среды E , привязанная к моменту времени $t_i \in T$
9	Определение пространства ситуаций	$R = \{ \lambda(t_i) \}$	$t_i \in T$ Последовательность ситуаций
10	Реакция системы на изменение ситуации для систем класса детерминированных (D), стохастических (P) и динамических (C) систем	$R(t_i): \lambda(t_i) \rightarrow x(t_{i+1})$	Реакция системы — ее переход в новое состояние $x(t_{i+1})$ в зависимости от ситуации $\lambda(t_i)$
11	Реакция системы на изменение ситуации для систем класса адаптивных (A) и интеллектуальных (I) систем	$R(t_i): \langle \lambda(t_i), \gamma(t_i) \rangle \rightarrow x(t_{i+1})$	Реакция системы — ее переход в новое состояние $x(t_{i+1})$ в зависимости от ситуации $\lambda(t_i)$ и цели управления $\gamma(t_i)$
12	Программа поведения системы	$G_k = \{ R(t_i) \}$	Последовательность реакций системы
13	Пространство программ поведения	$G_k \subset G$	Множество программ поведения системы
14	Механизм выбора программ поведения	$G(t_i)$	Правило, определяющее выбор программы поведения в момент t_i

Разработка моделей управляемого объекта осуществляется, как правило, в следующей последовательности.

1. Определение *структуры модели* с учетом задач обучения и структуры реального объекта.
2. Определение *перечня моделируемых параметров*, включая параметры моделирования аварийных и нештатных ситуаций.
3. Определение *интерфейсов модели* (разработка протокола информационного взаимодействия).
4. Определение способа реализации отдельных элементов модели (*физическая или математическая модель*).
5. Определение состава параметров модели, используемых в информационно-управляющем *поле оператора* на его рабочем месте и в информационно-управляющем *поле инструктора* на пульте контроля и управления тренажера.
6. Разработка частных технических заданий на построение моделей бортовых систем.
7. Описание *алгоритма* функционирования систем (собственно построение моделей систем реального объекта).

При выборе способа построения комплекса моделей систем объекта целесообразно использовать принцип модульности, суть которого заключается в том, что каждая модель бортовой системы или режима реализуется как отдельный программный продукт, а комплексы математических моделей объединяются специальным интерфейсом.

В общем случае модель бортовой системы (БС) состоит из аппаратной, математической и интерфейсной частей (рис. 2.7).

Аппаратная часть находится в РМО и включает в себя все органы управления, контроля, индикации и электрические приборы, входящие в состав моделируемой БС в штатном, технологическом или тренажерном вариантах.

Программная часть реализует на ВС тренажера математическую модель функционирования БС в штатных и расчетных нештатных ситуациях. Программная и аппаратная части связаны между собой через устройство сопряжения.

Интерфейсная часть модели бортовой системы находится на ПКУ и представляет собой форматы, с помощью которых инструктор осуществляет контроль и управление моделью, а также наблюдает регистрируемые исполнительными средой тренажера воздействия оператора на модель.

Модель объекта управления может строиться на основе двух принципиально разных подходов:

- 1) моделирование отрабатываемых на тренажере режимов без выделения узлов систем и блоков штатного объекта;
- 2) моделирование систем реального объекта как множества частных моделей, структура связей которых повторяет структуру реального изделия.

Во втором случае моделируется каждая система, каждый узел, поэтому одна и та же модель воспроизводит все возможные режимы работы и соответствующее

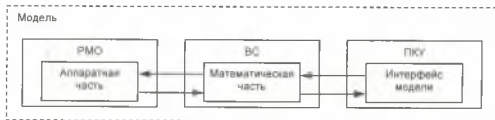


Рис. 2.7. Структура модели бортовых систем

реальному поведению, даже при воздействиях оператора, отличных от нормативных. Такое построение модели с точки зрения ее адекватности, полноты и возможности последующего расширения функций системы моделирования является более предпочтительным. При этом модель объекта имеет иерархическую структуру, которая отображает структуру (входимость систем, узлов и блоков) реального изделия.

При создании математической модели управляемого объекта одним из самых принципиальных вопросов является обеспечение адекватности модели (тренажера) и реального объекта (оригинала). Степень адекватности модели зависит от глубины моделирования, перечня моделируемых параметров (блоков, систем) и точности их моделирования.

При определении перечня моделируемых параметров и глубины моделирования необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- принадлежность моделируемого параметра информационно-управляющему полю оператора на рабочем месте реального объекта;
- принадлежность моделируемого параметра информационно-управляющему полю инструктора на пульте контроля и управления;
- необходимость моделирования параметра для обеспечения целостности и замкнутости алгоритма моделирования;
- необходимость моделирования параметра для обеспечения имитации аварийных и нештатных ситуаций на тренажере.

Для построения моделей при разработке тренажера необходимо осуществить математическое описание систем объекта управления и моделируемых процессов. С точки зрения описания и программной реализации систем управляемого объекта целесообразно все множество процессов и моделируемых систем разделить на два класса: непрерывные и дискретные. Поэтому в математической модели выделя-

ются логическая (модель логики функционирования БС при заданных воздействиях на нее) и параметрическая (расчетная) части. С точки зрения математики логическая часть относится к дискретным моделям (состояние которых меняется в дискретные моменты времени в результате внешнего воздействия или в соответствии с заданной внутренней циклограммой), параметрическая часть – к непрерывным моделям (изменение состояния непрерывно во времени). Эти части различаются способами описания и методами моделирования.

Как правило, дискретные модели можно описывать в виде конечного автомата:

$$S = \{U, X^s, Y, F, H\},$$

где U – множество входных воздействий; X^s – множество допустимых состояний системы; Y – множество выходных сигналов; F – функция переходов (правило определения последующего состояния системы по предыдущему состоянию и значению вектора входных воздействий); $F: U \times X^s \rightarrow X^s$; H – функция выходов, определяющая значения выходных сигналов; $H: U \times X^s \rightarrow Y$.

В каждый момент времени в модель поступает входной сигнал u_i , под действием которого она переходит в новое состояние в соответствии с функцией переходов.

Моделируя логику работы бортовых систем, удобно представлять бортовую систему как схему, конечными устройствами которой являются: входными (подающими сигналы на вход системы) – органы управления (тумблеры, переключатели, кнопки на пультах управления, ручки управления и т.д.), выходными (управляемыми) – органы контроля и индикации (транспаранты, светодиоды, индикаторы, сигнализаторы), а также действующие электрические приборы (светильники, вентиляторы, бортовые розетки и т.д.). В состав бортовой системы могут также входить различные датчики (на-

пример, давления, температуры, параметров состояния управляемого объекта).

В качестве исходной для разработки программной модели логики работы БС часто используются электрологические схемы, разрабатываемые на основе электрических схем, содержащихся в техническом описании БС. В зависимости от имеющихся в тренажной оболочке средств имитационного моделирования дискретных систем, электрологические схемы представляются в различном виде. При отсутствии системы имитации – в виде потоковых диаграмм (блок-схем алгоритмов), при поддержке событийного моделирования с описанием событий на алгоритмическом языке – в виде логических функций [134], при полной автоматизации – в графическом виде [157].

Использование языка логических схем полностью исключает этап программирования дискретной части модели БС. Он заменяется этапом формирования электрологической схемы непосредственно на экране компьютера из существующего в системе набора графических элементов, идентификации всех элементов схемы и занесения их в базу данных.

Графический язык схем – это язык дискретного моделирования, состоящий из графического редактора, транслятора и программы имитации. Пользователь описывает модель в виде электрологической схемы, являющейся формализованным описанием дискретной части модели. Описание модели преобразуется транслятором языка в структуру данных, необходимых в качестве исходных для программы имитации. На программу имитации возлагается задача конструирования программ и организации их выполнения в процессе имитации функционирования. Поэтому описание модели на языке дискретного моделирования (электрологическая схема бортовой системы вместе с описанием переменных, соответствующих элементам этой схемы) является полным описанием как математической модели, так и ее программной части.

Достоинством использования графического языка электрологических схем является:

- полная автоматизация процесса программирования дискретной части модели БС;
- семантический и синтаксический контроль введенной схемы;
- наглядность и простота модификации схемы.

Модели параметрических частей бортовых систем относятся к классу непрерывных моделей. Они представляют собой модели физических процессов, протекающих в системах реального объекта и регистрируемых датчиковой аппаратурой (например, в тренажере ПКА – изменение параметров атмосферы в гермоотсеках и шлюзовых камерах, расход топлива, движение подвижных конструкций ПКА, в том числе, солнечных батарей, крышек иллюминаторов, платформ с установленной на них радиотехнической и научной аппаратурой, токи, напряжения, заряды аккумуляторных батарей и т.д.).

Как правило, закон изменения параметров задается либо в виде функции от времени в графической, либо в алгебраической форме, либо в виде дифференциальных уравнений, в большинстве случаев линеаризованных. В целом структуру построения моделей определяет разработчик в процессе создания тренажера.

Приведем в качестве примера решения, которые принимаются в процессе разработки математических моделей космических тренажеров.

Разработка моделей бортовых систем и динамики движения ПКА является одной из наиболее сложных проблем при создании тренажных комплексов. Несмотря на наличие в составе тренажера аппаратуры реальных бортовых систем, их математическое моделирование является, тем не менее, необходимым условием по следующим причинам:

- условия функционирования бортовой аппаратуры на тренажере не соответствуют реальной космической обстановке;

- в условиях неподвижности тренажера датчиковая аппаратура системы управления не может функционировать адекватно космическому полету;

- ряд систем, например, двигательная установка, не могут штатно работать в условиях тренажера;

- тренажеры негерметичны и их внутренняя среда не соответствует полетной;

- физическая реализация воздействия внешней космической среды на системы тренажера (Солнце, положение Земли и звезд) не может быть осуществлена.

Все это приводит к необходимости создания математических моделей для тренажеров, основной задачей которых является обеспечение имитации работы бортовых систем, адекватной реальному космическому полету.

При реализации принципа модульности построения моделирующего комплекса каждая модель бортовой системы или режима реализовалась как отдельный программный продукт; комплекс математических моделей отдельного космического модуля реализуется на отдельном вычислительном крейте; комплексы математических моделей космических модулей объединяются специальным интерфейсом с моделью бортовой вычислительной системы.

При построении математической модели такой сложной системы, какой является тренажер ПКА, моделируемый объект разбивается на подсистемы (модели бортовых систем) с сохранением связей между ними, учитывающими их реальное взаимодействие. Разбиение осуществляется исходя из принципа слабой связности модулей, что позволяет уменьшить информационный трафик между модулями. Получившиеся таким образом подсистемы все еще сложны и продолжается их расчленение на более мелкие составные части до получения простых и удобных для непосредственного математического описания элементов системы.

Таким образом, математическая модель ПКА является многоуровневой кон-

струкцией из взаимодействующих элементов, объединенных в подсистемы различных уровней. Такое построение комплекса математических моделей бортовых систем предоставляет гибкие возможности их развития и корректировки.

Одним из важных вопросов на этапе проектирования был вопрос о выборе оптимальной "глубины" моделирования. Были определены два основополагающих принципа разработки. Во-первых, было принято решение об использовании в качестве базы математических моделей бортовых систем, которые применялись при наземной отработке бортового программного обеспечения. Это дало ряд преимуществ по сравнению с разработкой специальных моделей для тренажера:

- в условиях использования в качестве базы для модели бортовой вычислительной системы (БВС) штатного программного обеспечения достигалась адекватность взаимодействия моделей бортовых систем с моделью БВС на тренажном комплексе;

- в процессе наземной отработки бортового программного обеспечения отработку проходили алгоритмы и программы математических моделей бортовых систем;

- существенно снижались сроки и затраты на разработку.

Во-вторых, для каждой модели необходимо было определить оптимальный уровень соответствия реальной бортовой системе, удовлетворяющий требованиям подготовки экипажей, и осуществить в соответствии с этим доработку моделей.

Базируясь на указанных принципах, были разработаны математические модели бортовых систем для орбитального комплекса "МИР", орбитального корабля "Буран", международной космической станции (МКС). Основной состав моделей для перечисленных космических комплексов идентичен, хотя сами модели, как и бортовые системы, отличаются.

В частности, для тренажера Служебного модуля МКС разработаны математиче-

ские модели следующих бортовых систем:

- системы управления движением и навигацией (СУДН);
- системы управления бортовым комплексом (СУБК);
- объединенной двигательной установки (ОДУ);
- бортового радиотехнического комплекса (БРТК);
- системы электропитания (СЭП);
- системы ориентации солнечных батарей (СОСБ);
- системы управления приводами антенн (САУП);
- системы обеспечения теплового режима (СОТР);
- системы обеспечения жизнедеятельности (СОЖ);
- средств обнаружения и сигнализации о пожарной ситуации;
- системы радиационного контроля (СРК);
- системы стыковки;
- системы моделирования конструкций и механизмов.

Для имитации реальной космической обстановки разработана модель внешней физической среды МКС.

Математическая модель СУДН обеспечивает имитацию пространственного движения космической станции (движение центра масс, движение вокруг центра масс) в различных динамических режимах:

- различные режимы построения и поддержания ориентации станции;
- режимы навигации;
- маневры орбиты (подъем орбиты, сход с орбиты);
- сближение транспортных и грузовых кораблей и модулей со станцией.

Модель движения рассчитывается исходя из заданных массово-инерционных характеристик, величин тяги двигателей и их пространственного положения относительно масс станции.

Математическая модель СУДН Российского сегмента МКС взаимодействует с аналогичной моделью Американского сегмента МКС.

Модель СУБК представляет собой комплекс программ, имитирующих работу бортовой автоматики (включение/выключение приборов, переход на другие комплекты, переключение режимов работы приборов и систем).

Модель ОДУ имитирует работу двигательной установки в части автоматики управления и физических процессов, происходящих в ОДУ. Модель получает команды управления от модели БВС, реализует алгоритмы функционирования ОДУ, моделирует физические процессы в емкостях, магистралах, клапанах и пр. Данные о функционировании модели ОДУ поступают в модель БВС.

Большая часть БРТК реализована на тренажном комплексе в виде реальной аппаратуры. Модель БРТК реализует только те функции, которые не могут быть реализованы в наземных условиях или их реализация не требуется.

Математическая модель СЭП имитирует работу автоматики системы, в ней моделируется подача питания на бортовые шины, аварийные ситуации, приход-расход электроэнергии, реализован алгоритм накопления энергии в аккумуляторных батареях.

В модели СОСБ реализованы алгоритмы ориентации солнечных батарей в зависимости от положения станции относительно Солнца, которые формируются моделью движения.

Модель БВС управляет моделью СОСБ в зависимости от состояния энергетики станции по заданным алгоритмам.

Модель управления приводами антенн реализует алгоритм перемещения подвижных антенн станции в зависимости от ее ориентации относительно Земли. Модель БВС, получив данные от модели СУДН, формирует управляющие сигналы в модель САУП, где они реализуются.

В математической модели СОТР реализованы алгоритмы автоматики управления системой, осуществлено моделирование тепловых процессов в зависимости от общего состояния моделей работы борто-

вых систем, от ориентации станции относительно Солнца, от баллистических данных траектории полета на свету и в тени.

Модель системы жизнеобеспечения (СОЖ) реализует работу автоматики управления системой, газодинамические процессы. Она содержит модели газового состава атмосферы внутри станции, вентиляции пространства станции, модель изменения ее объемов.

Модель средств обнаружения и ситуационной о пожарной ситуации имитирует условия возникновения пожара и передает соответствующие сигналы на реальную сигнальную аппаратуру тренажера.

Модель СРК имитирует радиационную обстановку внутри станции в зависимости от ориентации станции относительно Солнца, высоты траектории полета и положения станции на орбите.

Модель системы стыковки имитирует работу автоматики, механизмов, датчиков стыковки и моделирует физические процессы в стыковочном агрегате (объединение полостей, выравнивание давлений и пр.).

Система моделирования параметров конструкций и механизмов имитирует работу элементов конструкции (раскрытие антенн, работу клапанов, переходных люков и пр.).

Модель внешней физической среды имитирует физические процессы, обусловленные влиянием Солнца, Земли, орбиты полета, ее ориентацией на станцию в процессе полета.

Модели системы управления бортовым комплексом, бортового радиотехнического комплекса, системы стыковки и внутреннего перехода описаны как чисто дискретные системы, а модель движения ПКА и модель внешней среды (положение Земли, Солнца, Луны, звездного неба относительно ПКА), входящие в модель системы управления движением – как непрерывные процессы.

В остальных моделях присутствуют в различной степени дискретные и параметрические части. К ним относятся мо-

дели пневмогидросистемы объединенной двигательной установки, системы электропитания, системы ориентации солнечных батарей, системы жизнеобеспечения и модель внутренней среды (модель атмосферы). На многих тренажерах в таких моделях сделано разделение процессов на дискретный и непрерывный, что значительно упрощает разработку алгоритмов моделирования БС и комплексную отладку тренажера.

Анализ моделей движения существующих тренажеров показал, что они включают в себя модули, описывающие собственно движение (орбитальное и угловое) ПКА (в дальнейшем эту часть модели будем называть ядром), модули, вычисляющие переменные для различных пользователей параметров модели движения (моделей бортовых систем и научной аппаратуры, имитаторов внешней визуальной обстановки, форматов ПКУ) и модули пересчета начальных условий.

Модели движения объектов для различных тренажеров имеют свою специфику и зависят от решаемых на данном тренажере задач. Например, на комплексных тренажерах транспортного космического корабля, в которых отрабатывается весь полет от выведения на орбиту до спуска, ядро модели содержит описание его движения на участках выведения, орбитального движения и спуска, движения относительно орбитальной станции на участках сближения, причаливания, стыковки и расстыковки.

Ядро модели движения транспортно-го космического корабля, реализуемое в специализированных тренажерах сближения и стыковки, включает модели его орбитального движения и движения относительно орбитальной станции.

Ядро модели движения комплексного тренажера орбитального модуля станции, имеющего систему управления движением, представляет собой модель его орбитального движения, модели угловых движений подвижных платформ относительно этого модуля и модели относи-

тельного движения модуля и транспортного корабля.

Модели движения исследовательских модулей, имеющих навигационные, научные установки и средства визуализации, в зависимости от отображаемых оператору параметров и условий проведения измерений, могут быть усеченными моделями орбитального движения. Например, если измерения проводятся при определенной ориентации комплекса в инерциальной системе координат, то не моделируется угловое движение комплекса.

Модель орбитального движения представляется в виде дифференциальных уравнений центра масс ПКА, как правило, в геоцентрической экваториальной прямоугольной системе координат.

Модель углового движения воспроизводит вращение ПКА в неограниченной сфере углов, без разрывов и особенностей и представляет собой кинематические дифференциальные уравнения либо в кватернионах, либо уравнения Пуассона в направляющих косинусах.

Кроме различного объема моделирования, модели движения на тренажерах отличаются точностью интерпретации исходных дифференциальных уравнений движения и применяемых методов интегрирования. Требуемая точность модели определяется задачами моделирования и требованиями потребителя выходной информации моделей. Наиболее высокие требования по точности предъявляются к моделям динамики тренажеров, использующих штатный бортовой вычислительный комплекс, наименее жесткие – к моделям процессов, обеспечивающих задачу подготовки для проведения научных и прикладных экспериментов. На существующих тренажерах для численного интегрирования дифференциальных уравнений в различных блоках моделей движения используются методы интегрирования Эйлера, Рунге–Кутты 2-го и 4-го порядка.

Вторую часть модели движения составляют расчеты параметров движения,

передаваемых в модели бортовых систем, в блоки управления имитаторами внешней визуальной обстановки и на форматы ПКУ. Объем и состав параметров определяются типом ПКА, используемыми имитаторами внешней визуальной обстановки и требованиями к формированию интегральной информации о движении и процессах управления ПКА для представления инструктору. Расчеты параметров представляют собой кинематические преобразования параметров из одной системы координат в другую либо с помощью матриц, либо с помощью кватернионов. Эта часть модели на существующих тренажерах по объему сравнима и даже может превышать ядро.

Третью часть модели динамики составляют блоки расчета начальных условий. В этих блоках по начальным условиям динамических режимов (начальное положение на орбите, ориентация корабля, относительные дальности и скорости сближающихся кораблей, положение солнца в приборах наблюдения и т.д.) вычисляются начальные параметры интегрирования уравнений движений ядра модели и параметры начального состояния имитаторов внешней визуальной обстановки. Эта часть модели содержит кинематические преобразования в матричной или кватернионной формах начальных параметров движения из заданных (удобных инструктору) систем координат в базовые системы координат, в которых производится моделирование уравнений движения. В ряде случаев инструктор может задавать начальные условия не на момент начала тренировки, а на некоторый последующий момент времени. В этом случае блок начальных условий содержит также модули интегрирования уравнений движений корабля, аналогичные модулям ядра.

Несмотря на то, что штатно-динамические операции проводятся в автоматическом режиме, экипаж принимает участие в их выполнении, а в нештатных ситуациях сам их осуществляет. Для выпол-

нения этой задачи на тренажном комплексе целесообразно реализовать подход, заключающийся в разработке унифицированной модели движения как отдельного модуля, связанного программным интерфейсом с модулями БВС и СУДН.

В целях унификации модели для реализации различных динамических режимов были использованы типовые уравнения, а их конкретная реализация осуществлялась заданием коэффициентов уравнений и начальных условий.

Модель движения разработана как универсальное приложение, работающее в реальном масштабе времени. Она включает модули расчета движения центра масс (ЦМ) и движения вокруг центра масс. При разработке модели движения были приняты следующие основополагающие принципы:

- системы координат, используемые в модели, совместимы с системами координат, реализованными в бортовом полетном программном обеспечении;

- учет изменения конфигурации космического комплекса в процессе его эксплуатации;

- для МКС предусмотрено взаимодействие модели движения, входящей в тренажерный комплекс Российского сегмента МКС с моделью системы управления, входящей в комплекс тренажеров Американского сегмента;

- унификация управления моделью движения путем расчета и задания начальных условий и коэффициентов для различных режимов и конфигураций станции;

- унифицированный интегральный пользовательский интерфейс оператора тренажера для задания инерционно-массовых характеристик, данных для расчета сил и моментов, создаваемых двигателями, начальных условий моделирования;

- унифицированный интерфейс модели движения с составными частями тренажерного комплекса, включая средства отображения информации экипажу космонавтов, средства имитации визуаль-

ной обстановки, средства отображения информации инструктору тренажера.

При разработке модели движения центра масс учитывалось, что для решения задач, стоящих перед тренажным комплексом, нет необходимости учитывать сопротивление атмосферы, силы притяжения небесных тел, электромагнитные силы и силы солнечного излучения. Эти упрощения без потери точности моделирования позволили существенно уменьшить время работы программ. При этом в расчетах учитывались возмущения, вызываемые второй горизонтальной гармоникой в потенциале гравитационного поля Земли [4]:

$$V(r, z) = \frac{\mu}{r} + \frac{1}{2} J_2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \left(1 - 3 \frac{z^2}{r^2} \right) = \frac{\mu}{r} + U(r, z),$$

где $\mu = 398601,3 \text{ км}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ – гравитационная постоянная Земли; $J_2 = 1,082682 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент при второй зональной гармонике в разложении потенциала тяготения Земли по сферическим функциям; $R_0 = 6378,155 \text{ км}$ – средний экваториальный радиус Земли.

Соответствующая сила тяготения имеет вид [22]:

$$\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_g = \text{grad} \left(\frac{\mu}{r} + U(r, z) \right);$$

$$\vec{F}_n = -\frac{\mu}{r^2} \vec{e}_r;$$

$$\vec{F}_g = -\frac{3}{2} \mu J_2 \frac{R_0^2}{r^4} \left(1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) \vec{e}_r - 3 J_2 \mu \frac{R_0^2}{r^4} \frac{z}{r} \vec{e}_z,$$

где $\vec{F}_n$ – ньютоновская сила притяжения; $\vec{F}_g$ – возмущающая сила от несферичности Земли; z – аппликата точки в инерциальной системе координат (ИСК); $\vec{e}_r$ – орт третьей оси ИСК; $\vec{e}_r$ – орт радиус-вектора точки.

Для описания движения центра масс (ЦМ) приняли:

- уравнения движения представить в орбитальной системе координат (ОСК);

- переменные уравнений движения:

$\vec{C}$ – вектор кинетического момента; $\vec{V}$ –

скорость центра масс; a – кватернион (параметры Родриго–Гамильтона (ПРГ) [22, 93]) преобразования координат из ИСК в ОСК.

Уравнения движения в векторной форме имеют вид [22, 67, 93]:

$$\dot{\vec{C}} + \vec{\Omega} \times \vec{C} = \vec{r} \times (\vec{F}_B + \vec{u}),$$

$$\dot{\vec{V}} + \vec{\Omega} \times \vec{V} = -\frac{\mu}{r^2} \vec{e}_r + \vec{F}_B + \vec{u}, \quad 2a = a \circ \vec{\Omega},$$

где $\vec{u}$ – управляющее ускорение от двигателей; $\times$ – знак векторного умножения;

$\vec{\Omega}$ – угловая скорость ОСК; $\dot{\vec{C}}, \dot{\vec{V}}$ – локальные производные векторов $\vec{C}$ и $\vec{V}$ во вращающейся системе координат; $\circ$ – знак кватернионного умножения.

Вращение МКС вокруг ЦМ описывается уравнениями [22,93]:

$$\dot{\vec{K}}^C + \vec{\omega} \times \vec{K}^C = \vec{M}^C(\vec{u}),$$

$$2\vec{b} = \vec{b} \circ \vec{\omega}; \quad \vec{K}^C = \vec{J}^C \bullet \vec{\omega},$$

где $\vec{K}$ – кинетический момент МКС относительно ЦМ; $\vec{J}^C$ – тензор инерции МКС, определенный в ЦМ; $\vec{M}^C(\vec{u})$ – главный вектор силы тяги двигателей; $\bullet$ – матричное произведение; $\vec{b}$ – ПРГ преобразования ОСК в ССК; $\vec{\omega}$ – угловая скорость МКС.

Спросируем уравнения движения на оси соответствующих систем координат: движение ЦМ – на оси ОСК; уравнения вращения – на оси ССК.

В ОСК:

$$\dot{\vec{r}} = r \vec{e}_r, \quad \dot{\vec{V}} = V_r \vec{e}_r + V_\varphi \vec{e}_\varphi;$$

$$\vec{F}_B = F_B \vec{e}_r + F_\varphi \vec{e}_\varphi + \vec{F}_{BC};$$

$$\vec{\Omega} = \Omega_r \vec{e}_r + \Omega_c \vec{e}_c,$$

$$a = a_0 + a_r \vec{e}_r + a_\varphi \vec{e}_\varphi + a_c \vec{e}_c.$$

В ССК:

$$\vec{K}^C = K_1^C \vec{e}_1 + K_2^C \vec{e}_2 + K_3^C \vec{e}_3,$$

$$\vec{M}^C(\vec{u}) = M_1^C \vec{e}_1 + M_2^C \vec{e}_2 + M_3^C \vec{e}_3,$$

$$\vec{\omega} = \omega_1 \vec{e}_1 + \omega_2 \vec{e}_2 + \omega_3 \vec{e}_3,$$

$$\vec{b} = b_0 + b_1 \vec{e}_1 + b_2 \vec{e}_2 + b_3 \vec{e}_3.$$

С учетом всего этого уравнения движения примут вид:

1. Движение ЦМ: $\vec{C} = r \vec{F}_\varphi$,

$$V_r - \Omega_c V_\varphi = F_r - \frac{\mu}{r^2}, \quad V_\varphi + \Omega_c V_r = F_\varphi,$$

$$2\dot{a}_0 = -\Omega_r a_r - \Omega_c a_c, \quad 2\dot{a}_r = +\Omega_r a_0 + \Omega_c a_\varphi,$$

$$2\dot{a}_\varphi = +\Omega_r a_c - \Omega_c a_r, \quad 2\dot{a}_c = +\Omega_c a_0 - \Omega_r a_\varphi.$$

2. Вращение вокруг ЦМ:

$$K_1^C + \omega_2 K_3^C - \omega_3 K_2^C = M_1^C(\vec{u}),$$

$$K_2^C + \omega_3 K_1^C - \omega_1 K_3^C = M_2^C(\vec{u}),$$

$$K_3^C + \omega_1 K_2^C - \omega_2 K_1^C = M_3^C(\vec{u}),$$

$$2\dot{b}_0 = -\omega_1 b_1 - \omega_2 b_2 - \omega_3 b_3,$$

$$2\dot{b}_1 = +\omega_1 b_0 + \omega_3 b_2 - \omega_2 b_3,$$

$$2\dot{b}_2 = +\omega_2 b_0 + \omega_1 b_3 - \omega_3 b_1,$$

$$2\dot{b}_3 = +\omega_3 b_0 + \omega_2 b_1 - \omega_1 b_2.$$

Переменные уравнений движения связаны уравнениями:

$$\vec{C} = r \vec{V}_\varphi, \quad V_r = r \Omega_c, \quad C \Omega_r = r F_c,$$

$$J_{11}^C \omega_1 + J_{12}^C \omega_2 + J_{13}^C \omega_3 = M_1^C,$$

$$J_{12}^C \omega_1 + J_{22}^C \omega_2 + J_{23}^C \omega_3 = M_2^C,$$

$$J_{13}^C \omega_1 + J_{23}^C \omega_2 + J_{33}^C \omega_3 = M_3^C,$$

$$\vec{F} = \vec{F}_B + \vec{u}, \quad F_{Br} = -\frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 (1 - 3a_{31}^2),$$

$$F_{B\varphi} = -3J_2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 a_{31} a_{32},$$

$$F_{Bc} = -3J_2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 a_{31} a_{33},$$

$$A = \|a_{ij}\| = \begin{bmatrix} a_0^2 + a_r^2 - a_\phi^2 - a_c^2 & 2(a_r a_\phi + a_0 a_c) & 2(a_r a_c - a_0 a_\phi) \\ 2(a_0 a_r - a_\phi a_c) & a_{01}^2 - a_r^2 + a_\phi^2 - a_c^2 & 2(a_0 a_c + a_\phi a_r) \\ 2(a_c a_r + a_0 a_\phi) & 2(a_c a_\phi - a_0 a_r) & a_0^2 - a_r^2 - a_\phi^2 + a_c^2 \end{bmatrix}$$

Радиус-вектор и скорость ЦМ МКС в проекциях на оси ИСК вычисляются по формулам:

$$x = ra_{11}, \quad V_x = V_r a_{11} + V_\phi a_{12},$$

$$y = ra_{21}, \quad V_y = V_r a_{21} + V_\phi a_{22},$$

$$z = ra_{31}, \quad V_z = V_r a_{31} + V_\phi a_{32}.$$

Столь удачно выбранные уравнения движения, их простота и малое количество позволило ограничиться при численном интегрировании методом Рунге–Куты второго порядка [75].

В соответствии с этой схемой был создан комплекс программ, использованный в космических тренажерах.

Указанный выше подход к построению комплекса моделей бортовых систем ПКА позволил упростить решение задачи сопряжения штатного бортового программного обеспечения с реальной аппаратурой тренажерного комплекса, обеспечил гибкость замены, модернизации и наращивания состава моделей при изменении конфигурации космической станции.

В результате принятых решений был достигнут достаточно высокий уровень соответствия моделей и реальных бортовых систем МКС, а сроки и стоимость создания комплекса моделей были существенно сокращены.

Следует подчеркнуть, что разработка структуры алгоритма моделирования и математических моделей является в большинстве приложений творческим процессом, который определяет не только адекватность тренажера и реального объекта, но и эффективность разработки тренажера в целом.

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ В ТРЕНАЖЕРАХ

В современных объектах управления все более широкое применение находят встроженные вычислительные устройства – бортовые вычислители, которые непосредственно включаются в контур управления объектом и являются основой для информационного обеспечения операторов. Как правило, бортовые вычислители применяются и для реализации алгоритмов управления движением реального объекта, и для управления его бортовыми системами. В связи с этим модель бортового вычислителя является одним из основных и важнейших элементов моделирующего комплекса тренажера.

Современные бортовые вычислительные системы реальных объектов строятся на базе одного или нескольких вычислительных устройств, объединяемых в единую вычислительную сеть; они работают в реальном времени с гибким распределением вычислительных ресурсов и реализуют автоматическое управление всеми режимами работы бортовых систем. Особенностью использования бортовых вычислителей является возможность предоставления операторам, которые осуществляют управление объектом, развитого интерфейса с современными средствами управления и отображения. Поэтому на бортовые вычислители возлагаются задачи взаимодействия с экипажем и наземным контуром управления. Кроме этого, они обеспечивают контроль состояния бортовых систем и выполняемых режимов на основе телеметрической информации.

Бортовое программное обеспечение представляет собой обычно достаточно сложный программный комплекс и харак-

теризуется развитой системой диагностики аппаратных средств и программного обеспечения, многоуровневой системой реализации алгоритмов контроля и управления и разнообразием способов взаимодействия с реальной аппаратурой. При создании программных средств бортовых вычислителей обычно предусматривается возможность развития и изменения баз данных, замены версий и корректировки программного обеспечения в процессе эксплуатации объекта.

При анализе методов моделирования бортовых вычислителей необходимо учитывать требования, вытекающие из задач создания тренажных средств, в частности:

- обеспечение штатного интерфейса бортовых вычислителей с экипажем;
- возможность оперативной модификации модели бортовых вычислителей при обновлении версий штатного программного обеспечения в процессе эксплуатации реального объекта;
- обеспечение возможности наращивания аппаратного и программного состава бортовых вычислителей в соответствии с изменением конфигурации реального объекта;
- обеспечение возможности взаимодействия с моделями кооперируемых реальных объектов;
- обеспечение взаимодействия модели бортовых вычислителей с моделью наземных пунктов управления;
- обеспечение поддержки ввода нештатных ситуаций в модель бортовых вычислителей.

Возможны два основных метода моделирования бортовых вычислительных систем (БВС):

- а) разработка математической модели БВС на основе алгоритмов бортового программного обеспечения и их реализация на серийных вычислительных средствах общего назначения;
- б) разработка математической модели БВС с использованием штатного бортового программного обеспечения.

Преимуществом первого варианта является более высокая гибкость последующей модернизации и возможность моделирования различных нештатных ситуаций, связанных с работой бортовых вычислителей. Однако этот вариант отличается высокой трудоемкостью и требует дополнительных затрат времени, связанных с разработкой, отладкой сложного программного продукта и сопряжением его со всеми системами тренажера.

Второй вариант может быть реализован на основе штатных бортовых ЭВМ или микропроцессорных систем общепромышленного изготовления, программно совместимых с бортовыми вычислительными системами реального объекта. Разработка математической модели БВС с использованием штатного бортового программного обеспечения может быть реализована в более короткие сроки. Следует отметить также следующие преимущества данного варианта:

- практически полная идентичность реальной БВС и ее модели;
- возможность вести параллельную разработку программного обеспечения для реального объекта и для тренажера, что обеспечивает выполнение требований по срокам его готовности к тренировкам;
- возможность своевременной замены версий программного обеспечения БВС на тренажере в соответствии с изменениями в штатном объекте.

При создании тренажерных комплексов для подготовки космонавтов в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина успешно применялись оба варианта реализации модели БВС: с использованием штатных бортовых вычислительных средств и с использованием микропроцессорных систем общепромышленного изготовления.

Например, бортовая вычислительная система орбитального комплекса "МИР" создавалась на базе специализированных бортовых вычислительных машин "Салют-5Б" и "Аргон-16". Причина такого подхода заключалась в отсутствии на тот

момент времени совместимых вычислительных средств в наземном исполнении. Кроме того, имевшиеся наземные вычислительные машины не обладали достаточной производительностью для реализации режима реального времени.

Дальнейшее развитие методы моделирования БВС получили при разработке тренажерного комплекса и тренажеров Российского сегмента МКС. Этому в значительной степени способствовало совершенствование вычислительной техники. Произошла унификация вычислительных машин в части совместимости программного обеспечения и обмена данными, получили мощное развитие операционные системы реального времени, языки программирования и системы управления базами данных.

При проектировании тренажерного комплекса и тренажеров Российского сегмента МКС нами был выбран способ реализации модели БВС, основанный на использовании штатного бортового программного обеспечения, адаптированного для общепромышленных вычислительных средств (промышленные компьютеры с шиной VME, программно совместимые со штатной БВС). Аппаратная и программная совместимость бортового и наземного (тренажерного) вычислительных комплексов, с учетом реализации в модели БВС шин MIL 1553 и Ethernet, позволила использовать на тренажерах штатные Laptor со штатным бортовым программным обеспечением и штатную аппаратуру "Символ-Ц". Благодаря принятым решениям обновление версий программного обеспечения на тренажере не превышало двух дней.

Использование в составе модели БВС штатного бортового программного обеспечения при создании тренажерного комплекса Российского сегмента МКС позволило достичь высокой степени соответствия тренажера реальной орбитальной станции и существенно сократить затраты на создание тренажерного комплекса. Реализация принципа модульности позво-

лила, с одной стороны, унифицировать тренажерный комплекс в целом, а с другой стороны, обеспечить наращиваемость модели БВС при изменениях конфигурации МКС. Существенно сократились сроки разработки модели БВС и время, необходимое на замену версий.

2.4. ТИПОВАЯ СТРУКТУРА ТРЕНАЖЕРА

С учетом приведенной структуры системы моделирования реального объекта (см. рис. 2.3) и функциональной структуры комплекса управления обучением (см. рис. 2.4) функциональную схему, отражающую состав тех систем, которые реализуют основные задачи тренажера, можно представить в виде, показанном на рис. 2.8.

Система моделирования объекта, которая реализует задачи моделирующего комплекса, включает в себя средства физического моделирования условий работы оператора, математического моделирования динамики движения и бортовых систем управляемого объекта, условий внешней среды и воздействующих на оператора факторов реальной деятельности (визуальной, акустической обстановки, акселерационных ощущений и др.). Физически моделируется обычно приборная среда, которая реализуется на основе макета рабочей зоны управляемого объекта.

Система контроля и управления тренировкой включает в себя подсистемы планирования проведения тренировки, оперативного управления тренировкой, оценки операторской деятельности и документирования процесса тренировки.

Остальные системы являются обеспечивающими. Комплекс информационного обмена и коммутации обеспечивает взаимосвязь технических и программных систем тренажера. Система тестирования и диагностики обеспечивает контроль работоспособности и выявление неисправных элементов. Система связи обеспечивает ведение переговоров инструктора



Рис. 2.8. Функциональная схема тренажера

ров с членами экипажа и технического персонала в процессе отладки и технического сопровождения проведения тренировки. Инструментальное обеспечение создается в целях автоматизации и упрощения разработки типовых программных систем конкретных тренажеров.

Для организации совместного функционирования всех систем в режиме реального времени и диспетчеризации вычислений в составе тренажера необходимо создание системных средств управления системами тренажера.

Тренажер представляет собой программно-аппаратный комплекс. Указанные функциональные системы реализуются частично программными средствами тренажера, частично на базе специально создаваемых технических средств.

На рис. 2.9 приведена структура комплекса технических средств тренажера.

Эта схема отражает вариант декомпозиции систем тренажера, в основе которого лежит выделение состава и взаимосвязей его физических компонентов.

Рабочее место операторов создается обычно на базе полномасштабного макета управляемого объекта. Макет может содержать ряд упрощений по сравнению с моделируемым объектом. Однако те блоки и системы, с которыми работает оператор и которые оказывают существенное влияние на формирование правильных навыков управления объектом, чаще применяются в штатном или близком к нему исполнении. Рабочее место операторов, представляющее собой учебно-трениро-

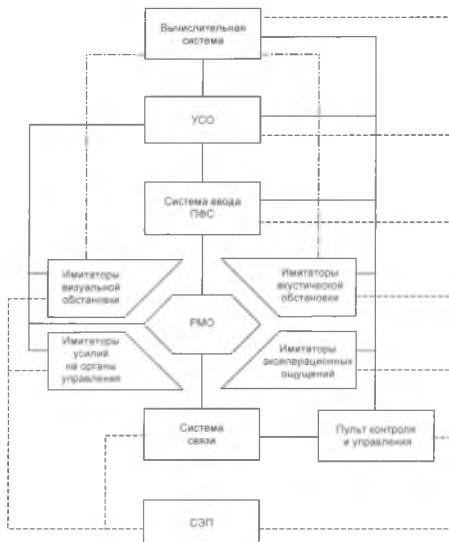


Рис. 2.9. Структура технических средств тренажера

вочный макет реального объекта с оборудованием, – это аппаратная часть модели объекта (см. п. 2.2).

Типовая структура рабочего места оператора приведена на рис. 2.10. В его составе могут быть выделены: конструктивный макет реального объекта, модели (макеты) интерьера, экстерьера и информационно-управляющего поля оператора, содержащего средства управления и индикации бортового оборудования.

Разработчик тренажера может выбирать различные виды исполнения бортового оборудования, используемого в макете:

а) использование штатного оборудования, которое изготавливают предприятия – разработчики оборудования реального объекта;

б) использование технологического оборудования, которое изготавливается как штатное, но допускается их выполнение с отклонением от технических условий и

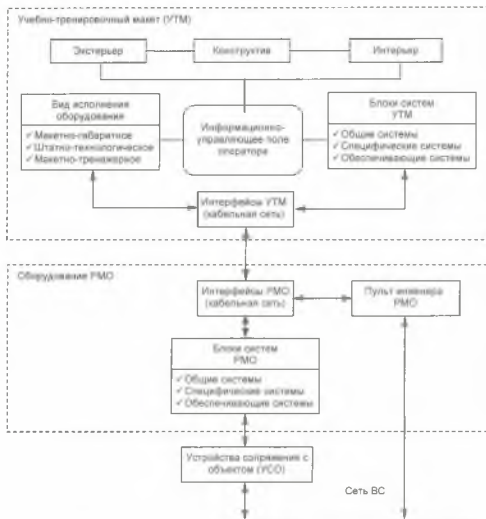


Рис. 2.10. Типовая структура рабочего места оператора в составе тренажера

штатной документации; например, оно может быть изготовлено из недефицитных материалов;

в) использование макетно-тренажерного оборудования, у которого внешний вид, размеры корпуса, места крепления, электроразъемы, маркировка, окраска и органы управления соответствуют штатным, а внутренняя компоновка либо может полностью отсутствовать, либо содержать технические средства, сопряженные с вычислительной системой;

г) использование макетно-габаритного оборудования, у которого только внешний вид, размеры корпуса и места крепления соответствуют штатным, а органы управления и индикации заменяются муляжами.

Пульт инженера является интегральным средством контроля за работой оборудования, размещенного в зоне РМО.

К РМО (см. рис. 2.9) примыкают имитаторы внешней обстановки, обычно с собственными компьютерными средствами управ-



Рис. 2.11. Структура программного обеспечения тренажера

ления для воспроизведения соответствующих факторов среды.

Для осуществления всех действий, которые должны производить инструкторы-методисты, в состав тренажера включается пульт контроля и управления тренировкой. Основными средствами пульта, как правило, являются мониторы (видео-контрольные устройства), подключаемые к вычислительной сети тренажера.

Для реализации программных средств моделирования объекта, управления имитационными системами, контроля и управления тренировкой и обеспечения системных функций создается вычислительная система тренажера.

Вычислительная система обеспечивает реализацию математической части моделей реального объекта и внешней

среды, функции поддержки рабочих мест инструкторов (ПКУ), а также управление всеми техническими системами тренажера.

Для электрического и информационного согласования бортового оборудования (аппаратной части модели объекта) и других технических средств (РМО, имитаторов, ПКУ и др.) с вычислительной системой в состав тренажера включаются устройства сопряжения с объектом (УСО). Они осуществляют управление аппаратурой, а также съем сигналов и передачу соответствующей информации в математическую модель объекта.

В состав технических средств тренажера включаются также система ввода психофизиологических сигналов (ПФС), снимаемых с оператора (см. разд. 6.4), аппаратные средства системы связи и сис-

тема электропитания (СЭП). Средства СЭП обеспечивают подачу электропитания с требуемыми параметрами на все технические устройства, а также защиту операторов от поражения электрическим током.

На рис. 2.11 представлена структура программного обеспечения тренажера. Для организации скоординированного выполнения всех программных задач в реальном масштабе времени в составе системного программного обеспечения необходимо создавать системно-ориентированную оболочку – промежуточное программное обеспечение, задачей которого является своевременный запуск всех основных процессов, информационный обмен между задачами, ведение службы времени и выполнение других функций, связанных с организацией вычислений. Более подробно вопросы реализации системного программного обеспечения изложены в гл. 8.

Все программные средства имеют, в основном, иерархическую структуру. Основные функциональные задачи интегрируются в рамках программных комплексов моделирования объекта (динамики движения объекта и моделей его бортовых систем (МБС)), моделирования внешней среды, управления имитаторами и управления тренировкой. Для связи с терминальным оборудованием создается программное обеспечение ввода-вывода информации через УСО.

При моделировании факторов внешней среды осуществляется расчет параметров визуальной, акустической обстановки, значений линейных и угловых ускорений и величины усилий на органы управления, а программные и аппаратные средства управления имитаторами обеспечивают формирование воздействий соответствующих факторов на анализаторы человека. Более подробно прикладные программные средства тренажера описаны в гл. 10–12.

На рис. 2.12 (см. цветную вкладку) приведена типовая структура тренажера,

на которой показана взаимосвязь его технических и программных средств. Основным звеном этой структуры является вычислительная система, средствами которой реализуются основные программные системы: комплекс программного обеспечения моделирования факторов реальной деятельности (ФРД), моделирования управляемого объекта и внешней среды, СУТ, технологическое программное обеспечение (ТПО), включающее средства тестирования и диагностики, инструментальное программное обеспечение (ИПО) и программное обеспечение средств ввода и вывода информации на периферийное оборудование.

Воспринимаемые оператором факторы внешней среды воспроизводятся имитационными системами (системы имитации визуальной, акустической обстановки, акселерационных ощущений и имитации усилий на органах управления). Технические средства имитационных систем включают в себя имитаторы соответствующих эффектов, преобразователи, коммутационные и выходные устройства. В состав имитационных систем включают обычно и программные средства, обеспечивающие формирование управляющих воздействий на имитационные системы в соответствии с моделируемыми ситуациями. Программные средства ПФК рассматриваются обычно как часть программного комплекса СУТ.

Общую структурную схему тренажера, представленную на рис. 2.12, можно считать типовой. Некоторую специфику могут иметь компьютерные тренажеры, в которых практически отсутствуют (или используются в минимальном объеме) аппаратные средства; в этих тренажерах в качестве пульта управления и контроля используются периферийные устройства компьютеров, а элементы информационно-управляющего поля операторов отображаются на экранах мониторов. В то же время и для таких тренажеров справедливы приведенные выше рассуждения, свя-

занные с общностью методологии создания моделей реального объекта и задач построения тренажеров для различных сфер деятельности операторов.

2.5. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ

При создании сложной управляемой системы вопрос об эффективной эксплуатации этой системы неизбежно возникает на самой ранней стадии ее проектирования. Поэтому если на операторов возлагаются серьезные и ответственные задачи, то решение о создании тренажера принимается на этапе проектирования нового изделия, и собственно разработка тренажера осуществляется параллельно с его созданием. В идеальном случае к моменту начала эксплуатации изделия создание тренажера должно быть завершено, и на его основе должна быть произведена практическая подготовка операторов, которые будут им управлять.

Такая ситуация порождает проблему своевременного получения разработчиком тренажера исходных данных об объекте, разработка которого еще не завершена, а также необходимость тесного взаимодействия разработчика тренажера и разработчика штатного объекта.

Облик создаваемого тренажера формируется в процессе подготовки технического задания на тренажер, в котором определяются цели его создания, объем реализуемых на его основе задач, состав моделируемых систем и факторов внешней среды, допустимость тех или иных отклонений и ограничений в воспроизведении условий реальной деятельности оператора, требования к возможностям и техническим характеристикам тренажера.

В процессе создания и опытной эксплуатации тренажера должны участвовать как непосредственные разработчики тренажера, так и разработчики штатного изделия, методисты-инструкторы (обучающий персонал) и лица, которые будут

осуществлять техническое обслуживание тренажера (рис. 2.13).

Последовательность работ, связанных с созданием тренажера, в целом соответствует общепринятой технологии создания новых изделий: выполнение и защита эскизного, технического и рабочего проектов, в материалах которых отражаются принимаемые технические решения и степень выполнения требований технического задания. Результатом выполнения указанных проектов является конструкторская и эксплуатационная документация на тренажер.

К наиболее существенным решениям следует отнести выбор варианта исполнения среды, реализующей условия деятельности оператора. Если тренажер строится на базе полноразмерного макета управляемого объекта, то чаще всего для его создания привлекается организация, которая создает штатное изделие. В качестве РМО могут быть использованы также опытные образцы изделия, создаваемые для его испытаний, или макеты с оборудованием, варианты исполнения которого (штатное, тренажерное, габаритно-весовые макеты и др.) соответствуют принятым решениям (см. п. 2.4).

Проектная модель тренажера строится на основе разрабатываемых методик подготовки операторов и планируемой модели процесса проведения тренировок. С учетом этого уточняются требования к глубине моделирования объекта и программному обеспечению системы управления тренировкой (ПО СУТ).

Одной из самых важных задач, решаемых в процессе построения тренажера, является создание моделирующего комплекса, который позволяет воспроизводить условия реальной деятельности оператора. При разработке реального объекта разработчик, как правило, формирует общую модель объекта или частные модели основных его систем. Эти модели реализуются в моделирующих стендах, которые используются для отработки тех-

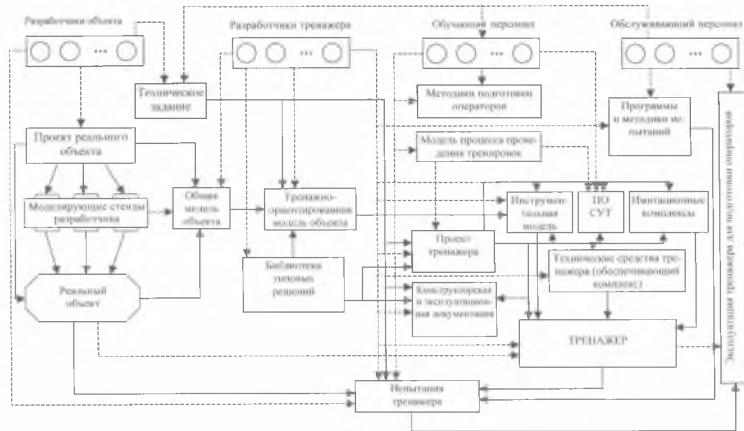


Рис. 2.13. Организация процесса создания тренажера

нических решений, отладки и исследования характеристик систем создаваемого объекта.

Указанные модели далеко не всегда пригодны для использования в тренажерах, так как при их разработке обычно не учитываются методические аспекты и специфика задач тренажера, связанная с выбором рационального уровня глубины моделирования систем управляемого объекта и процессов во внешней среде.

Следует отметить, что одному реальному объекту можно поставить в соответствие множество (универсальное или "континуальное" множество) различных моделей, отличающихся своей структурой, детальностью и точностью. При построении модели объекта в тренажере нужно учитывать, что модель безусловно должна быть адекватной, однако завышение требований к детальности описания и точности модели приводит к необходимости увеличения вычислительных затрат, следовательно (с учетом реализации моделей в реальном масштабе времени), мощности вычислительного комплекса, а значит и стоимости тренажера.

Таким образом, перед разработчиком тренажера всегда стоит задача создания экономичной модели, имеющей достаточную точность для правильного и адекватного воспроизведения условий работы оператора на тренажере точно так же, как на реальном объекте, и обеспечения идентичной реакции при тех же управляющих воздействиях. Здесь речь идет и о поведении объекта в целом, и о значениях основных параметров, описывающих протекание процессов на тренажере и реальном объекте. При решении задачи выбора уровня детальности и точности моделей необходимо в первую очередь учитывать характеристики реальной системы и возможности человека-оператора, характеристики его анализаторов, связанные с восприятием и обработкой информации. В результате на основе исходной общей модели реального объекта формируется мо-

дель, ориентированная на использование в тренажере.

На начальных этапах проектирования тренажера, как правило, формулируются требования к моделям бортовых систем, которые включают в себя тактические требования (или требования по назначению), технические требования, которые делятся на требования к аппаратной части модели, математической модели и интерфейсу модели, и требования к поставляемой документации (рис 2.14).

В процессе создания моделирующего комплекса тренажера целесообразно выделить следующие этапы.

1. Создание концептуальной модели объекта применительно к задачам разрабатываемого тренажера.
2. Создание формальной модели, представляющей полное описание объекта в абстрактной форме вне зависимости от способа ее реализации в тренажере.
3. Создание инструментальной модели, которая реализуется в тренажере на базе применяемых технических средств.

На этапе разработки концептуальной модели уточняется объем моделируемых задач, состав и структура моделей, определяется полный перечень параметров межсистемных связей и параметров, используемых для предъявления необходимой информации обучаемому оператору и инструктору. Указанный этап завершается формированием частных технических заданий на модели отдельных систем изделия.

При разработке концептуальной модели принципиально решается вопрос о способе реализации моделей систем и внешних объектов (на основе физического или математического моделирования). В частности, рабочее место оператора с приборными панелями (информационно-управляющее поле оператора) представляется обычно в виде физических моделей устройств, но вывод и ввод информации может осуществляться либо с использованием штатных, либо тренажных вариантов

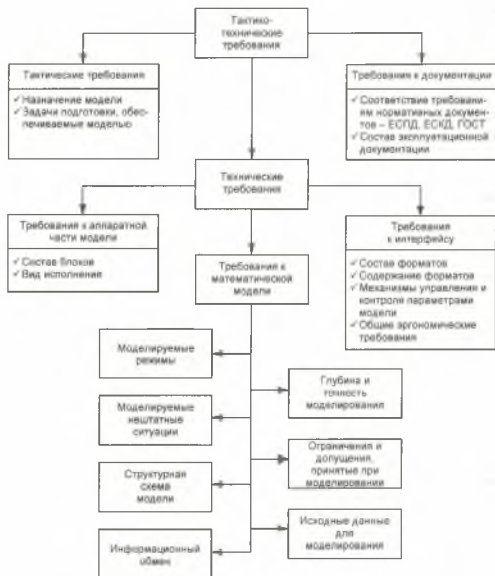


Рис. 2.14. Состав типовых тактико-технических требований к моделям БС

схем подключения приборов (см. п. 2.4), либо с использованием программных (численных) моделей. Вопрос о способе реализации моделей приходится решать в процессе моделирования факторов внешней среды и приборов измерения незлектрических параметров, а также при выбо-

ре формы представления информации об объекте инструктору.

Формальная модель создается на основе разработки алгоритмов математических моделей систем управляемого объекта и объектов внешней среды, а также выбора технических способов реализации

физических моделей, средств интерфейса оператора и инструктора.

При создании рабочего места оператора решаются следующие задачи:

1. Определяются требования к составу оборудования, устанавливаемому в его интерьере и экстерьере.

2. Определяется состав средств информационно-управляющего поля. В качестве исходных данных используются частные технические задания на разработку моделей бортовых систем.

3. Для органов управления систем и агрегатов, не имеющих электрических сигналов об их состоянии, предусматривается установка датчиков положения для передачи информации об их состоянии через устройства сопряжения в вычислительную систему.

4. Определяется вид исполнения бортового оборудования (см. п. 2.4).

5. Определяется вид исполнения кабелей (тренажный или штатный).

6. Проектные положения оформляются в виде технического задания и согласовываются с предприятиями – изготовителями УТМ и реального оборудования, разработчиками тренажера и инструкторами.

В силу большого разнообразия различных по принципу построения систем тренажера при его проектировании следует уделять особое внимание распределению задач между исполнителями и организации взаимодействия разработчиков различных систем. Например, при размещении в РМО приборов и устройств системы имитации, телевизионных средств,

медицинского оборудования разработчики РМО должны обеспечить посадочные места для этих устройств; прокладку кабельной сети в пределах РМО; подключение к оборудованию систем бортового электропитания.

Все разработчики, имеющие опыт создания тренажеров, в той или иной мере используют опыт своих предыдущих работ. Для уменьшения трудоемкости проектирования, затрат на создание и сроков создания тренажеров целесообразно формирование библиотеки типовых решений, типовых узлов и программных модулей, которые можно было бы использовать при проектировании последующих изделий, как уже готовых унифицированных компонентов. Наибольший эффект как с точки зрения построения отдельных тренажеров, так и для построения тренажерных комплексов, включающих ряд тренажеров, имеет место, когда все технические и программные средства представляются в виде иерархически упорядоченных унифицированных модулей, имеющих стандартизованный интерфейс.

Процесс создания тренажера завершается проведением его испытаний по согласованной программе и методике испытаний на соответствие техническому заданию. Особое значение при проведении испытаний имеет проверка адекватности моделирования объекта в целях исключения привития на тренажере ложных навыков управления объектом. Поэтому к проведению испытаний широко привлекаются и разработчики штатного объекта, и методисты.

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ В ИХ СОСТАВЕ

3.1. УНИФИКАЦИЯ И МОДУЛЬНОСТЬ – ОСНОВА СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ

Специфика области применения тренажера, особенности выполняемых операторами задач и средств, используемых в процессе управления конкретным объектом, приводят к тому, что каждый тренажер – это, как правило, уникальное изделие, которое несет в себе особенности управляемого объекта. Создаваемые разными разработчиками тренажеры существенно отличаются по уровню сложности, составу, способам построения систем тренажера.

В то же время, можно говорить о достаточно высоком уровне сходства всех тренажеров, общности их структуры и основного перечня задач, решаемых с их помощью. Это создает предпосылки для унификации технических и программных средств тренажеров.

Рассматривая перспективы наиболее эффективного построения средств тренажерной техники, нами, прежде всего, предлагается исходить из концепции унификации и модульного построения тренажеров и тренажерных комплексов [149].

Для того чтобы определить рациональный состав и структуру тренажерного комплекса, рассмотрим состав отдельного тренажера (см. п. 2.4), выделяя две группы его аппаратных и программных средств.

1. Идентичные и повторяющиеся элементы, которые в различных тренажерах могут быть либо одинаковыми, либо отличаться "мощностью" (возможностями)

ми) для разных по сложности объектов. Такими унифицированными элементами могут быть, например, компьютерные средства обработки информации, генераторы изображений визуальной обстановки, средства синтеза акустических шумов, каналы имитации связи, пульты контроля и управления тренировкой, стандартные модули устройств сопряжения с объектами, системные средства программного обеспечения и др. Элементы этой группы можно унифицировать и изготавливать заблаговременно.

2. Специализированные элементы и средства, которые отражают характер операторской деятельности и с учетом их специфики используются только в одном тренажере. К специализированным средствам относятся оснащаемые оборудованием УТМ или РМО, которые воспроизводят условия реальной деятельности экипажа, программно-аппаратные модели внешней среды. Кроме этого, к данному классу средств можно отнести модели специфических систем управляемых объектов, специализированные модули устройств сопряжения объектов (УСО) с вычислительной системой.

Динамика движения подвижных объектов, а также модели, которые воспроизводят поведение типовых объектов внешней среды, также могут быть в значительной степени унифицированы и, следовательно, отнесены к первой группе.

Унифицированные системы, элементы и узлы выполняются в виде типовых модулей. Система является модульной, если она спроектирована и реализована в соответствии со следующими принципами:

1) система полностью построена из отдельных блоков (модулей), которые

можно достаточно просто вводить в состав системы, заменять и модифицировать без потери ее работоспособности; модули должны быть максимально независимы друг от друга с точки зрения процессов их разработки, изготовления, тестирования, обслуживания, модернизации;

2) интеграция модулей в систему и взаимодействие между модулями осуществляется на основе унифицированных системных интерфейсов. Под унифицированностью интерфейса будем понимать, прежде всего, его независимость от способа реализации модулей.

Основными преимуществами концепции модульности являются гибкость в их применении и легкость модернизации тренажера. Модульная система технологична как с точки зрения ее разработки, так и на этапе ее эксплуатации и модернизации. Изготовление модульной системы легко разбивается на параллельные процессы. Модули разрабатываются и отличаются независимо. При квалифицированном проектировании трудоемкость этапа комплексирования становится минимальной. Кроме того, модули, составляющие систему, могут подвергаться модификации без необходимости перестройки других модулей и системы в целом. Например, для авиационного тренажера, построенного по модульному принципу, замена типа двигателя самолета-прототипа должна привести к модификации в модели объекта только модуля "модель силовой установки" на тренажере.

Важнейший класс модульных систем составляют открытые модульные системы. Их отличают гибкость структуры и способность к наращиванию. Открытые системы предъявляют дополнительные требования к степени унификации межимодульных интерфейсов. Для таких систем должны быть реализованы базовые интерфейсы, независимые не только от способа реализации модулей, но и от специфики решаемых модулем задач, так как пути расширения системы могут быть заранее не известны. При этом системные

межимодульные интерфейсы являются надстройкой над базовыми интерфейсами. Открытые модульные системы имеют заведомо более длительный жизненный цикл, поскольку позволяют не только модернизировать свои модули, но и включать в свой состав новые модули, расширяющие функции системы.

Например, при проектировании тренажеров пилотируемых орбитальных станций приходилось учитывать, что сама космическая станция строится на орбите постепенно. При этом практически в течение всего срока эксплуатации и состав, и логика работы ее систем подвержены изменениям. Следовательно, тренажеры орбитальных станций также должны обеспечивать их многократную модернизацию и наращивание решаемых задач без вывода тренажеров из эксплуатации. Естественно, что такие тренажеры были спроектированы как открытые модульные системы.

Сама идея открытых модульных систем, естественно, не нова, но ее последовательная реализация при построении сложных систем является нетривиальной научной и технической проблемой. Выше перечислялись многочисленные преимущества модульных систем, проявляющиеся при их изготовлении, эксплуатации и модернизации. Однако эти преимущества приходится оплачивать значительными затратами времени и ресурсов на этапе проектирования такой системы. Следовательно, для повышения эффективности следует искать такое решение проблемы, при котором результаты проектирования можно было бы использовать многократно. Анализ типовой структуры тренажера, рассмотренной в п. 2.4, подтверждает тот факт, что системы, которые являются элементами такой структуры, могут быть в высокой степени независимыми, унифицированными, самостоятельными продуктами. И тренажер в целом, и его системы необходимо проектировать как открытые модульные системы [149, 150, 151, 157].

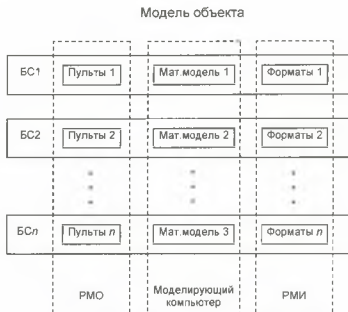


Рис. 3.1. Схема декомпозиции модели реального объекта

Технология построения тренажеров на основе унифицированных модульных средств впервые была принята в нашей стране в 1978 году и успешно использована для создания тренажеров по программам ДОС "Салют", ОК "Мир" и МКС [149, 151]. За рубежом, несмотря на опережающие в целом темпы работ в области тренажеростроения, концепция модульного построения тренажеров была принята позже (в вооруженных силах США в 1984 – 1985 гг.; в Германии и Франции – в 1987 – 1988 гг.).

В рамках такого подхода тренажерные системы могут быть спроектированы либо как универсальные, либо как состоящие из универсальных модулей. Высокая степень унификации может быть достигнута при построении таких систем тренажерных комплексов, как вычислительная система (включая общее математическое обеспечение и инструментальное программное обеспечение), система имитации акустической обстановки, система связи, система контроля и управле-

ния тренировками, система психофизиологического контроля [149]. Эти компоненты без изменений или с небольшими изменениями могут быть использованы в различных тренажерах.

Исходя из концепции модульного построения тренажера разработчик должен на начальных стадиях проектирования произвести декомпозицию всех технических и программных средств на модули. Решение этой задачи представляет собой, как правило, итерационный процесс: сначала выделяются крупные модули, затем в каждом модуле выделяются подсистемы или узлы, образующие модули следующего уровня и т.д.

Указанная декомпозиция производится, по возможности, и для специализированных средств тренажера. На рис. 3.1 представлен один из вариантов схемы декомпозиции модели объекта. В соответствии с этой схемой, модель бортовой системы состоит из:

– аппаратной части (блоки, пульта, органы управления), являющейся одновременно частью РМО;

- математической части, имитирующей логику работы БС на вычислительных средствах тренажера;

- интерфейса пользователя (назовем его компоненты форматами), предоставляющего инструктору возможность контролировать параметры моделируемой бортовой системы, управлять режимами работы модели БС в части решения учебно-методических задач (физически размещается на рабочих местах инструктора).

Идея подобного деления состоит в том, чтобы проектировать все три выше-названные части не независимо, а как единый объект – модель бортовой системы. В этом случае разработчик, учтя учебно-методические требования к бортовой системе, может выполнить деление модели БС на аппаратную и математическую части и определить требования к виду исполнения блоков, пультов и органов управления. Например, если при анализе учебных задач выясняется, что один или несколько бортовых пультов должны обеспечивать дополнительные сигналы по сравнению со штатным пультом, то их следует создавать в тренажном исполнении.

Указанную схему декомпозиции модели объекта можно рассматривать как первый шаг выделения модулей бортовой системы.

Пересечения вертикальных и горизонтальных слоев фактически определяют состав модулей, из которых должна состоять модель объекта, а горизонтальные и вертикальные связи между модулями определяют набор интерфейсов, которые необходимо сделать унифицированными. Так, связи между математическими моделями бортовых систем и их пультами фактически определяют необходимые интерфейсы УСО, а прочие связи должны быть реализованы средствами общего математического обеспечения вычислительной системы, являющегося программной средой исполнения для моделей и форматов. Это означает, что ОМО может быть спрое-

ктировано так, чтобы совокупность математических моделей и форматов была организована как открытая модульная система, на которую ОМО должно уметь настраиваться. Пример такой вычислительной системы рассматривается в гл. 8.

В результате, разработчики специфических систем и пользователи тренажера получают все преимущества открытых модульных систем, включая независимую разработку каждой модели и каждого формата, легкость комплексирования, сопровождения и модернизации.

Каждая модель бортовой системы реализуется как отдельный модуль, который, в свою очередь, может состоять из отдельных подмодулей и т.д. Такое построение комплекса моделей бортовых систем предоставляет гибкие возможности их развития и модификации.

Необходимо отметить, что подход к созданию тренажерных комплексов и тренажеров на основе принципов модульности и унификации, с учетом типовой структуры тренажера, предложенной в п. 2.4, позволяет обеспечить решение следующих задач:

- одноразовое проектирование и многократное использование компонентов тренажерных комплексов для подготовки операторов;

- непрерывное развитие (наращивание) тренажных средств, легкость их модернизации;

- коллективное использование программно-аппаратных средств единого тренажерного комплекса в различных тренажерах;

- сокращение сроков создания тренажеров;

- сбережение ресурсов и сокращение стоимости создания тренажеров;

- возможность создания новых тренажеров или модернизация действующих без остановки тренировок на других тренажерах, входящих в тренажерный комплекс.

3.2. ТИПОВАЯ СТРУКТУРА ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Если решение многофункциональных задач подготовки операторов требует создания не отдельного тренажера, а набора тренировочных средств, то принципиально возможны два подхода к формированию структуры создаваемого комплекса.

1. Создание комплекса тренажеров, которые разрабатываются независимо как автономные изделия; при необходимости взаимодействия тренажеров предпринимаются специальные меры для их технического и программного сопряжения.

2. Создание тренажерного комплекса, структура которого отличается тем, что их основные подсистемы и модули рассматриваются как распределяемые ресурсы, которые сосредоточены в рамках систем, объединяющих однотипные элементы. Тренажеры формируются из необходимых для его функционирования компонентов (согласно структуре, приведенной в п. 2.4), которые вводятся в его состав на период проведения тренировки.

В последнем случае унифицированные системы могут быть реализованы как системы коллективного пользования, обслуживающие сразу несколько тренажеров.

Основные соображения, которые принимаются при переходе от автономных тренажеров к тренажерным комплексам, состоят в том, что тренажер рассматривается не как жесткая замкнутая система, а как совокупность соответствующим образом построенных унифицированных аппаратных и программных модулей, связанных между собой стандартизованными интерфейсами. В тренажерном комплексе такие модули интегрируются в рамках единых функциональных систем, обладающих необходимыми свойствами и возможностями. Из этих систем можно конструировать тренажные средства, объединяя модули в требуемой конфигурации.

Возможность реализации такого подхода обусловлена тем, что объединяемые в систему однородные по характеру выполняемых функций унифицированные модули можно рассматривать как распределяемый ресурс системы; их можно путем перекоммутации использовать в составе разных тренажеров.

По аналогии со структурой типового тренажера на основе объединения модулей, реализующих соответствующие задачи, образуются следующие системы тренажерного комплекса (рис. 3.2, см. цветную вставку):

- 1) вычислительная;
- 2) контроля и управления тренировками;
- 3) имитации визуальной обстановки;
- 4) имитации акустических шумов;
- 5) связи операторов с персоналом управления;
- 6) электропитания (на рисунке не показана).

Вычислительная система строится на основе локальной или распределенной вычислительной сети, к которой подключаются технические средства всех тренажеров. Организация обработки информации и взаимосвязанного функционирования в реальном масштабе времени всех тренажеров описана в гл. 8.

Система контроля и управления тренировками строится на основе унифицированных пультов контроля и управления тренировками и унифицированных программных модулей, обеспечивающих настройку, установку исходных данных, контроль хода моделирования и действий операторов с использованием разрабатываемых для каждого тренажера типовых форматов.

Пульты контроля и управления тренировками строятся на базе унифицированной конструкции и оснащаются однотипным набором средств, включающих мониторы компьютеров вычислительной сети, видеоконтрольные устройства для отображения визуальной обстановки,

средства связи и органы управления. Органы управления пультов подключаются через УСО к вычислительной сети, а видеоконтрольные устройства при проведении тренировки с использованием средств телевизионной системы коммутируются на выбираемые инструктором каналы формирования изображений в средствах наблюдения экипажа. Технические решения, принимаемые при создании системы контроля и управления тренировками, описаны в гл. 12.

Система имитации визуальной обстановки представляет собой набор унифицированных носителей изображений типовых объектов и коммутируемых каналов передачи изображений к средствам наблюдения операторов и инструкторов. Унифицированные модули управления имитаторами обеспечивают расчет управляющих воздействий таким образом, чтобы положение наблюдаемого объекта соответствовало моделируемой на тренажере ситуации.

Если в качестве генераторов изображений применяются оптико-механические имитаторы, то для того, чтобы использовать их как общий ресурс, в каждом имитаторе устанавливаются телевизионные камеры. Они преобразуют изображение объекта в телевизионный сигнал, что позволяет осуществлять при необходимости дальнейшие преобразования, видеозапись изображения и его коммутацию на тот канал наблюдения, который используется экипажем в текущий момент. Более полное описание данной системы приводится в гл. 10.

Система имитации акустических шумов представляет совокупность управляемых генераторов, которые синтезируют (воспроизводят) акустические шумы и эффекты, соответствующие моделируемой ситуации. В состав этой системы входят также коммутируемые каналы передачи звуковых сигналов на воспроизводящие акустические системы, размещаемые в зоне расположения экипажей.

Система связи операторов с персоналом управления представляет собой совокупность унифицированных каналов проводной связи, которые имитируют работу штатных систем ведения переговоров операторов между собой и с персоналом пунктов управления. В зависимости от моделируемой ситуации и задач, отрабатываемых в процессе тренировки, в канале связи может регулироваться уровень слышимости и уровень помех.

При формировании тренажера средства вычислительной техники и все остальные модули унифицированных систем тренажерного комплекса подключаются к РМО с помощью устройств сопряжения с объектом (УСО).

Унифицированное исполнение базовых модулей функциональных систем тренажерного комплекса и возможность их переподключения к разным пользователям позволяет реализовать режим коллективного использования общих ресурсов (унифицированных модулей) этих систем. Как правило, количество одновременно работающих тренажеров ограничено, а общий арсенал средств, необходимых для выполнения всех операций, в несколько раз превышает то число средств, с которыми непосредственно работает экипаж в текущий момент времени. Поэтому целесообразно одни и те же модули использовать для разных тренажеров последовательно по принципу "проката".

В тренажерном комплексе, построенном на основе описанной выше концепции, появляется возможность отработки взаимодействия двух и более экипажей, работающих в разных тренажерах в процессе решения общей задачи (например, при сближении и стыковке космических аппаратов) на основе информационной и программной увязки динамики движения и функционирования имитируемых в тренажерах систем. Появляется дополнительная возможность экономии ресурсов: одни и те же модули, например средства

вычислительной техники, могут использоваться в различных тренажерах, что при рациональном расписании дает возможность уменьшить общее количество средств, особенно модулей тех тренажеров, загрузка которых не столь интенсивна. Множественность модулей дает возможность резервировать неисправные элементы и при отказах сохранять основные функции в полном объеме, либо с ограничениями для менее приоритетных задач.

Модульное построение тренажерного комплекса позволяет производить оперативную замену отдельных модулей. Это особенно важно в связи с частыми изменениями состава и логики функционирования систем в штатном изделии. При достаточно длительном сроке эксплуатации тренажеров и, как следствие, моральном и физическом старении отдельных их элементов и систем, модульное построение комплекса позволяет обеспечить удобство их ремонта и замены.

Таким образом, концепция тренажерных комплексов позволяет получить принципиально новые качества по сравнению с набором автономных тренажеров как в плане полноты решаемых задач подготовки операторов, так и с точки зрения эффективности использования ресурсов.

Для тренажерного комплекса характерно:

- наличие развитой инфраструктуры комплекса, ресурсы которой совместно используются входящими в состав комплекса тренажерами;
- построение тренажеров на единых принципах с максимальным использованием унифицированных систем, модулей и ресурсов комплекса.

3.3. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ В ИХ СОСТАВЕ

Новый подход к построению тренажерных комплексов влечет за собой необходимость разработки и применения но-

вой технологии создания тренажеров. Сущность технологических изменений, которые приносят новые подходы к интеграции тренажерных средств в рамках тренажерного комплекса, состоит:

1) в изменении последовательности создания компонентов, порядка комплексирования и развития комплекса, включающего в себя ряд тренажеров;

2) в формировании и изменении конфигурации тренажеров с учетом комплекса одновременно решаемых задач подготовки операторов на текущем временном интервале;

3) в порядке использования тренажера в процессе проведения тренировки.

Изменение последовательности создания систем и подсистем комплекса заключается в опережающей разработке, изготовлении и комплектации базовых типовых средств тренажеров, ориентированных на целый класс объектов. В состав этих средств вводятся каналы имитации визуальной обстановки, акустических шумов, связи, системы электропитания, средства локальной вычислительной сети, которые имеют унифицированную структуру, универсальный интерфейс сопряжения между собой и с другими системами. Разрабатываются также универсальные средства программного обеспечения для автоматизированного контроля и управления процессом подготовки на тренажерах, средства информационного и отладочного сервиса. С учетом указанных соображений, основные принципы создания тренажерного комплекса и тренажеров в его составе могут быть сформулированы следующим образом.

1. Инфраструктура тренажерного комплекса, состоящая из типовых унифицированных модулей, разрабатывается и изготавливается заблаговременно. Это может делаться в период, когда реальный объект еще находится в стадии разработки и, следовательно, нет достаточной информации для разработки его тренажерной модели. Впоследствии это существ-

венно сократит время на создание тренажера.

2. Типовые унифицированные модули разрабатываются как открытые системы, которые в последующем могут дополняться и расширяться с учетом конкретного применения и характера решаемых на тренажерах задач. Совокупность типовых унифицированных модулей и сопряжения между ними образуют базовые системы общего назначения тренажерного комплекса (рис. 3.3, см. цветную вставку).

3. После принятия решения о создании нового тренажера (базовые системы общего назначения к этому времени уже созданы) производится разработка и отладка РМО, УСО, моделей бортовых систем и других специфических устройств создаваемого тренажера. Специфические системы также создаются по принципу открытых модульных систем в соответствии с требованиями инфраструктуры тренажерного комплекса. Совокупность специфических систем и модулей и сопряжений между ними образуют базовые системы специального назначения (см. рис. 3.3.)

4. Интеграция аппаратных и программных модулей базовых систем общего и специального назначения в рамках тренажерного комплекса обеспечивается инфраструктурой комплекса, его системными аппаратно-программными средствами, за счет унификации интерфейсов и дисциплины взаимодействия модулей. Это позволяет в рамках тренажерного комплекса создавать ряд тренажеров от 1 до N (или тренажных каналов), которые формируются во время проведения тренировок.

Из унифицированных модулей создается инфраструктура тренажерного комплекса, обеспечивающая интеграцию унифицированных аппаратных и программных модулей и организацию их пользования тренажерами комплекса.

В свою очередь, специфические системы и модули создаются по общим для

комплекса правилам и на основе унифицированных интерфейсов интегрируются в тренажерный комплекс.

После создания систем коллективного пользования создание и включение в состав комплекса нового тренажера производится в следующем порядке.

1. Формируется общая структура тренажера на основе использования типовых базовых систем.

2. Производится разработка и изготовление рабочего места операторов (макета управляемого объекта). Отличие в реализации этого этапа состоит лишь в более широком использовании тренажных вариантов приборного оборудования, обеспечивающих применение стандартных средств сопряжения с вычислительным комплексом.

3. Производится разработка методик подготовки обучаемых с использованием средств тренажера с учетом характеристик и возможностей базовых средств тренажерного комплекса; разрабатываются форматы инструктора, алгоритмы контроля и оценки деятельности обучаемых.

4. Совместно с разработчиками штатных объектов разрабатываются адекватные математические модели систем ПКА с использованием универсальных шаблонов (с учетом требований разработанной системной среды).

5. Производится разработка специализированных средств и далее комплексирование, ввод в эксплуатацию и последующее техническое сопровождение тренажера.

Для проведения тренировки осуществляется формирование тренажера путем физического подключения технических устройств с помощью коммутаторов, а использование унифицированных программных модулей производится путем их инициализации на основе адресации к ним. Таким образом, модули систем коллективного пользования не связаны жестко с конкретными тренажерами и включаются в их состав только на период проведения тренировки.

Организация функционирования тренажерных каналов осуществляется в соответствии с планом проведения занятий на текущий период.

В процессе планирования и проведения тренировок можно выделить следующие этапы:

- подготовительный (технологический);
- конфигурирование и загрузка систем коллективного пользования и тренажеров (формирование каналов для проведения тренировки);
- проведение тренировок на тренажерах для отработки предусмотренных планом задач;
- анализ результатов тренировок, реконфигурирование структуры комплекса после завершения тренировки.

Подготовительный этап выполняется заблаговременно. На этом этапе с учетом расписания тренировок и необходимых средств для моделирующего комплекса и СУТ определяется необходимая конфигурация средств тренажерного комплекса и формируется расписание работы его технических средств. В случае проведения ответственных (например, экзаменационных) тренировок отдельные средства тренажерного комплекса могут быть сконфигурированы как резервные.

Для каждого тренажера, входящего в тренажерный комплекс, создается собственная конфигурация, согласованная с конфигурациями других тренажеров этого комплекса.

В начале смены обслуживающий персонал осуществляет подготовку и ввод файлов конфигурации и начальных условий, выполняет пробную загрузку систем и тренажеров (тренажных каналов) и проверку работоспособности конфигурации.

Непосредственно перед тренировкой осуществляется загрузка подготовленной и проверенной конфигурации тренажера и систем тренажерного комплекса. Различные тренажеры могут загружаться (и выгружаться) независимо, в соответствии с

расписанием их работы. Общее математическое обеспечение вычислительной системы (ОМО ВС), считывая подготовленные конфигурационные файлы, динамически настраивается на выбранную систему моделирования (или ее версию) и конфигурацию вычислительных средств. При этом автоматически конфигурируются необходимые потоки данных между прикладными модулями и узлами ВС.

Тренажеры, функционирующие в составе тренажерного комплекса, имеют набор типовых режимов работы (см. гл. 12). Переход из режима в режим в одних случаях осуществляется управляющей программой по собственной циклограмме, а в других – по командам обслуживающего персонала. В частности, режим инициализации выполняется автоматически непосредственно после загрузки модулей специального математического обеспечения тренажера. Если тренажеры сконфигурированы для совместной работы, команды перехода из режима в режим, выданные на одном из тренажеров, автоматически транслируются на взаимодействующие тренажеры для синхронности их функционирования.

После начала тренировки (поступления команды "Пуск тренировки") запускается процесс моделирования воспроизводимых на тренажере ситуаций и начинается отсчет модельного времени. ОМО ВС производит периодический вызов моделей системы моделирования для вычисления параметров состояния моделируемого объекта на текущий момент модельного времени и осуществляет обмен данными между программными модулями и узлами вычислительной системы. Информация о ходе тренировки, работе моделей и систем, действиях обучаемых и т.п. отображается на ПКУ на заранее подготовленных форматах. ВС обеспечивает актуальность данных на входе модели или формата в каждый момент времени.

Синхронное управление работой всех систем тренажеров и комплекса в

реальном времени обеспечивается службой реального времени. Синхронизация может производиться либо от внешнего источника меток времени, либо от одного из узлов ВС (от любого компьютера, который сконфигурирован как главный).

После выполнения тренировки, как правило, предусматривается выполнение режима "Анализ результатов тренировки". В этом режиме результаты выводятся на внешние носители, и в удобное для персонала время может производиться апостериорная обработка информации, например, расчет показателей операторской деятельности на основе формализованных методов. По требованию инструктора на экран монитора может выводиться история событий, список команд, которые обрабатывались моделями с момента загрузки тренажера (с привязкой к модельному времени) и др.

На принципах модульности, естественно, могут создаваться и автономные тренажеры, однако в тренажерном комплексе полная сборка тренажера из систем фактически производится только на период тренировки. При наличии соответствующих ресурсов базовых систем общего назначения одновременно могут формироваться несколько тренажеров, а если их операторы должны взаимодействовать, то устанавливаются информационные связи между ними. В этом состоит важное преимущество создания тренажеров на базе тренажерных комплексов перед автономными тренажерами.

За рубежом аналогичная описанной технология создания тренажеров и распределенных моделирующих комплексов разрабатывалась в отделе перспективных разработок МО США, в виде совокупности стандартов, как технологии распределенной интерактивной имитации (DIS) и высокоуровневой архитектуры моделирования и имитации (HLA M&S) [6–10].

Предлагаемая концепция модульности и унификации создания тренажеров и тренажерных систем во многом предвосхищала современную активно развиваю-

щуюся сервисно-ориентированную архитектуру (SOA) информационных систем.

Идея SOA заключается в создании архитектурной платформы, которая обеспечит быструю консолидацию распределенных компонентов – сервисов – в единое решение для поддержки определенных процессов.

Интерфейсы – ключевые элементы SOA. Они должны быть нейтральны к специфике реализации сервиса, которые определяются аппаратной платформой, операционной системой, языком программирования. Подобный нейтралитет обеспечивает универсальность взаимодействия сервисов в разнородной среде, а сервисы, интегрированные посредством таких интерфейсов, являются слабо связанными. Слабая связанность обеспечивает простую и быструю адаптацию системы в целом к изменениям в структуре и принципах реализации сервисов. Таким образом, для SOA характерна гибкость, способность реагировать на изменения в бизнес-процессах динамично и без сложных трансформаций на интеграционном уровне.

Сервисы в SOA представляют собой простые или сложные объекты, процессы.

Основное качество SOA – слабая связанность. Благодаря этому свойству, сервисы обретают мобильность, способность перемещаться с сервера на сервер, не требуя координации со всеми потребителями.

Позднее связывание позволяет отложить момент конечной сборки связей до момента исполнения, а не времени разработки программы, что характерно для традиционных монолитных систем. Можно также во время исполнения менять параметры связи (такие как адрес, протокол и канал взаимодействия). Это придает несколько измерений гибкости самой связке между провайдером и потребителем сервиса. В частности, провайдер и потребитель могут исполняться на сколь угодно удаленных инфраструктурах. Каждая система может иметь собственные

параметры жизненного цикла, а любые изменения в них, не затрагивающие интерфейс сервиса, не требуют остановки ни одного из них.

SOA – концепция, которая не дает точного описания, как именно должны взаимодействовать сервисы, но говорит о том, как добиться того, чтобы они понимали друг друга и могли быть интегрированы.

Вместе с тем, SOA рассматривается не только как архитектура для развертывания и выполнения распределенных приложений решений, но и как модель программирования, в которой приложения строятся исходя из того, что они могут предоставлять в сетевой среде сервисы другим приложениям с помощью описания и публикации соответствующих интерфейсов.

Основным требованием к реализации SOA является включение в нее среды разработки, которая базируется на стандартной компонентной платформе и должна обеспечить многократное использование создаваемых продуктов и поддерживать интеграцию унаследованных систем.

Основные принципы SOA.

1. Распределенное проектирование. Решения относительно внутренних особенностей информационных систем принимаются различными группами людей, имеющими собственные организационные, политические и экономические мотивы.

2. Постоянство изменений. Отдельные участки архитектуры могут претерпевать изменения в любой момент времени.

3. Последовательное совершенствование. Локальное улучшение компонентов архитектуры должно приводить к совершенствованию всей архитектуры в целом – к росту суммарной полезности компонентов того же уровня, что и изменяемый, равно как и компонентов более низкого и более высокого уровня.

4. Рекурсивность. Однотипные решения имеют место на различных уровнях архитектуры.

SOA, основанная на адаптации этих принципов, позволяет объединить в об-

щий взаимодействующий организм информационные системы, принадлежащие различным автономным организациям и их относительно автономным структурным подразделениям.

Информационные инфраструктуры по объективным причинам существенно отличаются у разных компаний. Уникальный набор унаследованных систем, организационная структура, характер трудовых отношений и т.д. сформировали собственные процессы управления информационными услугами. Даже в рамках одной большой организации наверняка существуют приложения, обладающие собственной "культурой" управления, имеющей как глубокие исторические корни, так и технические предпосылки. SOA позволяет обеспечить взаимодействие, не нарушая сложившихся зон ответственности.

Контракты сервисов – документ, специфицирующий ожидания сервиса по отношению к его потребителям и наоборот. Использование на этом этапе XML имеет принципиальное значение, позволяя и провайдеру, и потребителю сервиса не зависеть от конкретной платформы реализации. Технические контракты, формулируемые провайдером сервисов, должны быть доступны потенциальным потребителям для интерпретации, анализа и реализации интеграции. Для этого используется специальный реестр, каталогизирующий доступные сервисы.

Последние годы SOA приобретает черты международного стандарта. В перспективе эта система может рассматриваться как стандартная системная среда для построения различных информационных систем, в том числе, распределенных тренажерных комплексов.

3.4. ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В процессе создания тренажерного комплекса разработчики должны принимать технические решения, обеспечи-

вающие рациональное построение комплекса, в частности, выбор его эффективной структуры, рациональную декомпозицию систем на модули, оптимизацию параметров систем и режимов их функционирования.

Для решения этих задач можно производить сопоставительный анализ расчетных характеристик комплексов при различных вариантах реализации, а также использовать различные теоретические и экспериментальные методы, в том числе, методы решения дискретных многокритериальных задач, оптимизационные методы и методы имитационного моделирования [112].

Методы решения многокритериальных задач целесообразно использовать, в частности, для исследования и выбора предпочтительного класса структур x^* и выбора варианта эффективной структуры в классе x^* . В качестве примера рассмотрим, как решалась эта задача при построении тренажерного комплекса для подготовки космонавтов.

На первом этапе было сформировано множество X , приемлемых с точки зрения проектировщиков и пользователей возможных классов структур (всего рассматривалось 24 класса). Задача выбора предпочтительного класса структур была поставлена и решена как дискретная многокритериальная задача теории принятия решений с частичным и полным упорядочением сравниваемых классов ($x \in X$, $|X| = 24$) по выбранным критериям.

В качестве критериев использовались: надежность K_1 , ресурс процессора K_2 , величина капитальных вложений K_3 , способность программ к модификации K_4 , длительность разработки K_5 .

Для формирования оценок $K_i(x)$ использовался комплекс разработанных аналитических и имитационных моделей.

Программно реализованный алгоритм частичного упорядочения классов $x_1 \in X$, $x_r \in X$ предусматривает последовательное понижение мощности подмноже-

ства классов – ядра $X^0 \subset X$ по Нейману–Моргенштерну, при этом классы попарно сопоставляются на каждом шаге путем определения выполнения бинарного отношения R_i , предпочтения:

$$R_1: K_i(x_i) \leq K_i(x_r), \quad i = \overline{1, 5};$$

$$R_2: K_3(x_r) - K_3(x_i) \geq L, \quad L = \text{const};$$

$$R_3: x_i R_3 x_r \Leftrightarrow \frac{P(x_i, x_r)}{P(x_r, x_i)} \geq C,$$

где $P(x_i, x_r)$ – подмножество критериев $K_i(X)$, по которым x_i предпочтительнее x_r ; C – индекс согласия.

Полное упорядочение элементов $x \in X^0$ осуществляется на основе построения аддитивной функции ценности $v(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5)$.

При разработке процедуры выбора класса структур предусматривается возможность учета требований нескольких лиц, принимающих решения (специалиста-проектировщика и пользователя).

Решение указанной задачи позволило сделать вывод, что в условиях, когда разрабатываемые программные средства тренажерного комплекса предназначены для создания в его составе нескольких тренажеров, наиболее предпочтительным является класс унифицированных пакетов прикладных программ (ППП) модульно-иерархической структуры с собственной управляющей программой и выделенным унифицированной (для всех тренажеров) и специализированной частей.

На этапе определения конкретного варианта эффективной структуры в выбранном классе x^* ставилась задача обоснования величины программных модулей и структуры их связей, а также определения параметров, характеризующих организацию вычислительного процесса (тип дисциплины обслуживания D , и распределение приоритетов L), производительность процессора B (или квант q времени работы процессора).

На этом этапе в качестве критерия эффективности целесообразно использо-

вать сравнительный экономический эффект $\mathcal{E}_k$, величина которого позволяет оценить для некоторого варианта V_k изменение затрат на проектирование ΔK , эксплуатацию ΔW и сопровождение ΔY ППП на его полном жизненном цикле T_c по сравнению с конкурентноспособной версией V_i (монолитная программа, уникальная для каждого тренажера и управляемая стандартными средствами операционной системы).

Комплекс программных средств тренажера рассматривается как совокупность M модулей, каждый из которых в свою очередь состоит из ряда программных блоков a_i . При формировании структуры комплекса необходимо прежде всего установить целесообразность включения блоков в те или иные модули.

Ставится задача максимизировать целевую функцию

$$\max \mathcal{E}_k = \frac{\Delta K}{T_c} (1 + E_k) + \Delta W + \Delta Y$$

при ограничениях на величину капиталовложений $K' \leq K^0$, срок проектирова-

ния $T' \leq T^0$, время обработки сигналов каждого i -го типа $T_i \leq T_i^0$, общее количество модулей $M \leq Q$, производительность процессора $B \leq B_{\max}$ (E_k – нормативный коэффициент капиталовложений).

Для решения данной задачи были получены зависимости составляющих эффекта от изменения трудоемкости (за счет устранения дублирования отдельных программ и необходимости разработки аналогичных ППП для других тренажеров ΔK_D , усложнения тестирования ΔK_t , разработки интерфейсов и управляющих программ ΔK_u , тиражирования ΔK_R , сроков проектирования ΔK_T , эксплуатационных издержек на выполнение в ЭВМ управляющих программ и обработку интерфейсов ΔW_u , а также вследствие изменения организации вычислительного процесса ΔW_p , затрат на сопровождение, связанных с устранением ошибок ΔY_z и совершенствованием программ ΔY_c .

После введения параметра, определяющего структуру модульного комплекса

$$x_{iv} = \begin{cases} 1, & \text{если блок } a_i, (i = \overline{1, n}) \text{ обрабатывающих и управляющих} \\ & \text{программ, } a_i \in A \text{ входит в модуль } m_v, (v = \overline{1, m}); \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

программ, процесс определения этих параметров и характеристик вычислительного процесса D, n, L, B, q сводится к решению многоэкстремальной задачи нелинейного частично целочисленного программирования.

Ввиду большой размерности этой задачи, ее практическое решение с учетом выпуклого в целом при локальных экстремумах характера зависимости эффекта от средней величины модуля

$$\Theta_m = \sum_{i=1}^n \Theta_i / m, \quad \text{осуществлялось путем}$$

выделения двух самостоятельных этапов:

1) поиск рационального размера Θ_m^* модулей, максимизирующего общий эф-

фект $\mathcal{E}_k$ при локально-минимальных затратах на ресурсы процессора;

2) синтез вариантов структуры для субоптимальной области $[\Theta_m^* \pm \Delta]$ величины модулей и выбор наиболее эффективного из них по критерию D (затраты на межмодульные интерфейсы).

Комплекс основных алгоритмов синтеза модульной структуры с устранением дублирования программных блоков $a_i \in A$ и минимальными затратами D на межмодульные интерфейсы включает в себя:

а) формирование общего графа информационных связей G программ A для обработки всех сигналов s_i , вершинам которого соответствуют блоки a_i , а ду-

гам – передаваемые информационные параметры с помощью заданной таблицами решений рекуррентной процедуры над матрицей инцидентий:

$$A = UA, \quad I = \overline{1, q}, \quad |A| = \{a_l\} = n,$$

$$\forall s_l | S = \{s_l\} \rightarrow \exists a_l | A_l = \{a_l | l = \overline{1, t}\}$$

$$\forall a_l, a_m | A = \{a_1, \dots, a_l, \dots, a_m, \dots, a_N\} \rightarrow a_l \neq a_m;$$

б) разбиение полного графа информационных $\Theta_l^{(D)}$ и управляющих $\Theta_l^{(U)}$ связей на модули по критерию минимальных затрат с ограничениями на допусти-

мую величину модулей $\sum_{l=1}^n \Theta_l \leq \Theta^*$, а

также на полноту и избыточность совокупности модулей:

$$D = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \delta_{ij}^{(m)} x_{kj} (1 - x_{ik}),$$

$$\delta_{ij}^m = F(\delta_{ij}, R_A, R_B),$$

$$\delta_{ij} = \sum_{l=1}^q \lambda_l (\Theta_l^{(D)} - \Theta_l^{(U)}) y_{ij} x_{ij},$$

где $y_{ki} = 1$, если блок a_k обрабатывает i -й сигнал,
0 в противном случае;

$\delta_{ij}^{(m)}$ – затраты на интерфейс в межмодульной среде, зависящие от величины δ_{ij} в исходной блочной структуре и варианта распределения блоков a_i, a_j по модулям, проявляющегося в типе, возникающих в итоге отношений управления (активизация R_A ; передача управления с возвратом R_B).

Решение задачи разбиения основано на использовании направленного перебора и приемов его сокращения, использующих идею минимальных подмножеств.

Для оптимизации параметров вычислительной системы, режимов ее работы и

алгоритмов обработки информации использовался комплекс разработанных математических моделей, отражающих работу системы на разных уровнях детализации ее описания и позволяющих получить количественные оценки критериев и показателей качества функционирования для исследуемых вариантов.

В качестве критериев оценки были выбраны загрузочно-временные характеристики: коэффициенты загрузки устройств, время ответа на запрос, время ожидания в очереди и т.д., а также вероятности особых ситуаций (превышение времени реакции предельного значения, переполнение буферного накопителя и т.д.).

В качестве концептуальных моделей использовались стохастические сети обслуживания различных модификаций. Для расчета загрузочно-временных характеристик преимущественно использовались аналитико-численные методы, которые предполагают описание работы системы на языке событий в некотором дискретном пространстве состояний, автоматическое построение программы расчета интенсивностей перехода из одного состояния в другое, численное решение системы алгебраических уравнений, расчет стационарных вероятностей состояний и расчет требуемых характеристик модели.

Для проведения вычислительных экспериментов в условиях, близких к реальным, использовался комплекс программ имитационного моделирования. Модель, необходимая для решения конкретной задачи проектирования, собирается на фазе настройки из имеющихся в библиотеке базовых модулей. Каждый такой модуль соответствует одному узлу стохастической сети. Отдельные узлы моделируют функциональные устройства системы (процессоры, каналы ввода-вывода, устройства хранения данных, терминалы, устройства сопряжения и передачи данных и т.д.). Степень детализации узла определяется целью моделиро-

вания. Маршрут движения требования (транзакта) на выделение ресурсов в модели задается значениями набора параметров транзакта.

Используя предложенный метод решения задачи обоснования параметров и структуры программных средств, были определены оптимальные величины квантов времени, выделяемых отдельным ППП, размеры буферных зон памяти, а также оценена возможность появления в тренажерном комплексе "узких мест" в процессе его эволюции.

3.5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЗДАНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ НА БАЗЕ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Вопросы качества подготовки обучаемых, которое позволяет обеспечить тренажер или группа тренажеров, обычно рассматривают как основной критерий эффективности тренажерной базы. Например, согласно ГОСТ РВ 29.05.005-95: "Эффективность тренажера определяется возможностью подготовки операторов до требуемого уровня за заданное (максимально приемлемое) время с учетом исходного состояния общеобразовательных и социальных знаний обучаемых".

В гл. 1, в результате рассмотрения многофункциональных задач подготовки операторов сложных объектов, была показана недостаточность даже самых развитых автономных тренажеров для полноценной подготовки обучаемых. Так, если наличие комплексного тренажера обязательно для проведения комплексных тренировок, то его использование для практических занятий по отдельным системам и процедурам слабо эффективно и снижает пропускную способность учебного центра. Обычно в подобных случаях приходится уменьшать объем практических занятий, что сказывается на качестве подготовки (см. рис. 1.3, 1.4).

Многофункциональные, взаимосвязанные задачи подготовки операторов требуют создания комплекса, включаю-

щего в себя как полнофункциональные комплексные тренажеры, так и специализированные тренажеры для тренировок по отдельным наиболее сложным и ответственным операциям. Тренажерные комплексы, спроектированные системно и в соответствии с требованиями программы обучения операторов, позволяют обеспечить практическую деятельность обучаемых на всех этапах их подготовки. Например, в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, несмотря на наличие комплексного тренажера транспортного корабля "Союз-ТМА", эксплуатируются два специализированных тренажера этого корабля, предназначенных для подготовки космонавтов по операциям стыковки транспортного корабля с орбитальной станцией, имеется отдельный специализированный тренажер "Телеоператор" для выполнения ручной стыковки экипажем станции, используются различные учебные стенды для теоретической и практической подготовки по системам (в том числе выполненные на базе действующих тренажных макетов корабельных пультов). При оценке эффективности такого подхода безусловно было учтено, к каким потерям приводит неудачная стыковка в результате неполной подготовки экипажа по этим операциям.

Таким образом, эффективная тренажерная база учебного центра должна включать в себя тренажеры разных классов и назначения, обеспечивающие программу подготовки обучаемых с необходимой полнотой и пропускной способностью. Очевидно, что проектирование такой тренажерной базы как единого тренажерного комплекса позволяет оптимально распределить функции и задачи тренажеров, входящих в состав комплекса.

В ряде случаев одним из эффективных вариантов обеспечения взаимодействия тренажеров в составе тренажерного комплекса является возможность объединения математических моделей их борто-

вых систем в общую систему математического моделирования. При этом задача организации взаимодействия между системами разных тренажеров решается так же, как и задача обеспечения обмена данными между моделями одного тренажера.

Примером такой реализации может служить тренажерный комплекс Российского сегмента Международной космической станции, разработанный авторами для РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, в котором модели бортовых систем комплексных тренажеров орбитальных модулей "Звезда" и "Заря" МКС были объединены в общую систему моделирования. Это позволило обеспечить работу экипажа космонавтов на них как на едином тренажере, наряду с возможностью автономного функционирования каждого из тренажеров в отдельности. Практика показала, что совместный режим работы этих тренажеров оказался наиболее востребованным и отвечающим реальным условиям эксплуатации орбитальных модулей. Очевидно, что такой путь обеспечения тесного взаимодействия для автономных тренажеров закрыт.

Другой пример новых функциональных возможностей дает система управления тренировкой тренажерного комплекса Российского сегмента МКС. Тренажеры модулей "Звезда" и "Заря" имеют собственные пульты контроля и управления (ПКУ), с которых осуществляется управление тренировками. Очевидно, однако, что при проведении совместной тренировки эргономичнее иметь всю необходимую информацию и средства управления обоими тренажерами на одном из ПКУ.

Благодаря тому, что в тренажерном комплексе ПКУ и системные программные средства унифицированы, оказывается возможным сконфигурировать любой из двух ПКУ (или сразу оба) для решения этой задачи. В случае, если бы тренажеры были построены как автономные, при их совместной работе было бы необходимо иметь персонал управления тренировкой

на каждом из ПКУ, обеспечивая организационными методами их согласованную работу.

Важной функциональной особенностью тренажерных комплексов является их высокая гибкость, во многих случаях позволяющая обеспечить решение вновь возникающих задач с минимальными затратами средств и труда. Проиллюстрируем эту особенность на примере тренажерного комплекса Российского сегмента МКС.

Выше уже говорилось, что задача обучения управлению стыковкой грузового транспортного корабля экипажем МКС решается с помощью специализированного тренажера "Телеоператор". Выполнение этого упражнения на комплексном тренажере первоначально не предполагалось. Однако в ходе выполнения международной космической программы оказалось, что существует необходимость выполнения упражнения на фоне комплексных режимов работы орбитальной станции, тренировки перехода из режима в режим и от одного вида деятельности к другому. Решить эту задачу можно было только на комплексном тренажере модуля "Звезда" Российского сегмента МКС.

Самым быстрым способом решения задачи оказалась возможность использования для этой цели комплекса моделирования тренажера "Телеоператор" на основе организации взаимодействия необходимого оборудования (пульта, ручек управления сближением, телевизионной аппаратуры) тренажеров. Несмотря на то, что территориально тренажеры находятся в разных корпусах РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, наличие соответствующих каналов связи позволило авторам монографии выполнить работу в кратчайшие сроки.

Безусловно, с точки зрения эргономики такое решение нельзя назвать удачным из-за сложности управления подобной тренировкой. Оно и было использовано только как временное. Однако сам факт возможности подобных быстрых

решений в тренажерном комплексе является прекрасным подтверждением степени его гибкости.

Позднее задача была решена полностью путем переноса программного обеспечения специализированного тренажера "Телеоператор" на вычислительные средства комплексных тренажеров модулей "Звезда" и "Заря" и организации его информационного взаимодействия с системой моделирования комплексных тренажеров. Благодаря единой структуре систем моделирования в тренажерных комплексах, это потребовало относительно небольшой доработки пакетов моделирования двух тренажеров.

Помимо новых функциональных возможностей тренажерных комплексов по сравнению с парками автономных тренажеров важно также отметить возможность создания единого методического обеспечения подготовки операторов на тренажерах комплекса.

Важной особенностью тренажерных комплексов является наличие развитых средств коллективного пользования. Используя одни и те же средства в различных тренажерах в режиме "проката", удастся сократить потребности в сложных и дорогостоящих устройствах (ЭВМ, ПКУ, имитаторах визуальной обстановки и др.). Например, расчеты, сделанные специалистами РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина по результатам создания тренажерного комплекса по орбитальной программе "Мир", показывают, что, несмотря на высокую стоимость проектирования (это был фактически первый проект такого масштаба, многое делалось впервые; подробнее см. п. 16.2), стоимость создания комплекса и тренажеров в его составе оказалась на 30 % меньше, чем при создании аналогичного по возможностям парка автономных тренажеров. Кроме того, в связи с сокращением объема технических средств уменьшается площадь помещений, необходимых для их размещения.

Значительная экономия достигается также при повторном использовании уни-

фицированных компонентов и целых систем тренажерного комплекса. Например, в комплексных тренажерах орбитальных модулей "Звезда" и "Заря" Российского сегмента МКС и в компьютерных тренажерах для предтренировочной подготовки космонавтов в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина используется одно и то же специальное программное обеспечение, содержащее модели бортовых систем и форматы инструкторов. Это стало возможным благодаря тому, что и в полномасштабных, и в компьютерных тренажерах используется общее математическое обеспечение вычислительной системы тренажерного комплекса.

За счет отработанной технологии и использования унифицированных общесистемных технических и программных средств комплекса удастся снизить требования к количественному составу и уровню квалификации разработчиков прикладных компонентов тренажеров.

Аналогичные факторы способствуют сокращению стоимости эксплуатации тренажерных комплексов:

- построение тренажеров из унифицированных компонентов уменьшает требования к ЗИП (одним ЗИП можно обслуживать несколько тренажеров);
- резервирование средств коллективного пользования эффективнее, чем резервирование систем каждого тренажера;
- использование единых общесистемных технических и программных средств снижает требования к количественному составу и уровню подготовки эксплуатирующего персонала.

Важным показателем эффективности технологии создания тренажерной базы являются сроки ввода тренажеров в эксплуатацию. Из многолетнего опыта работ, выполнявшихся в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, известно, что разработка и ввод в эксплуатацию одного автономного специализированного тренажера для подготовки космонавтов осуществляется в течение не менее 3 лет, а разработка ком-

плексного космического тренажера занимает 4 года и более.

Технология создания тренажерных комплексов предусматривает опережающее строительство инфраструктуры комплекса и систем коллективного пользования (возможно до завершения работ над техническим проектом на реальный объект). Последующее создание на этой основе тренажеров в составе комплекса позволяет сократить сроки их ввода в эксплуатацию как минимум на год. Например, в период строительства в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина трех тренажерных комплексов (1980 – 2000 гг.) удавалось в среднем ежегодно вводить в эксплуатацию один комплексный или специализи-

рованный тренажер для подготовки космонавтов.

Таким образом, несмотря на то, что тренажерный комплекс представляет собой более сложную систему, чем парк автономных тренажеров, имеется много факторов, делающих тренажерные комплексы более эффективным инструментом подготовки обучаемых с точки зрения стоимости и сроков его создания и развития, расходов на эксплуатацию, качества обучения. Очевидно, чем сложнее задачи подготовки и шире состав необходимых для выполнения программы обучения тренажеров, тем больше преимущества тренажерного комплекса перед парком автономных тренажеров.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРЕНАЖЕРОВ И ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ

Под качеством понимается совокупность свойств и характеристик продукта, которые придают ему способность удовлетворять потребности тех лиц, которые ее будут использовать [42].

Тренажеры и тем более тренажерные комплексы представляют собой достаточно сложные программно-технические системы, которые характеризуются множеством различных показателей, образующих иерархическую структуру (рис. 4.1–4.3).

Система показателей проектируемого тренажера формируется еще на ранних стадиях ее создания. В частности, большая часть показателей определяется на стадии формирования Технического задания с учетом назначения, специфики применения и требований специалистов, которые будут эксплуатировать тренажерные комплексы. Часть показателей формируется и уточняется на этапе проектирования тренажера или тренажерного комплекса (в частности, в процессе принятия принципиальных технических решений) и изготовления тренажера.

Тщательный анализ прогнозируемых показателей качества создаваемых средств тренажной техники имеет особую важность в связи с тем, что от их правильного и обоснованного выбора зависит уровень профессиональной подготовки обучаемых операторов, обоснованность

затрат на создание тренажеров, эффективность их эксплуатации и способность создаваемых комплексов к последующей модернизации и расширению функциональных возможностей.

Разумеется, принимаемая система показателей определяет и технические решения, связанные с созданием тренажера. При использовании формальных методов оптимизации структуры и параметров подсистем тренажера, как правило, применяются однокритериальные методы решения задач. В то же время, очевидно, что задача создания тренажера является многокритериальной, причем оптимизация параметров по одному критерию нередко ухудшает другие показатели качества. Поэтому в процессе разработки следует рассматривать систему показателей качества тренажера и тренажерного комплекса в целом и, принимая технические решения, находить разумные компромиссы. В частности, выбирая критерии оптимизации, необходимо вводить четкие ограничения по параметрам, определяющим другие показатели качества, либо сразу применять методы решения многокритериальных задач.

Структуру показателей, приведенную на рис. 4.1–4.3, не следует считать полной и однозначной. Во-первых, система показателей качества может в значительной мере зависеть от специфических требований пользователя. Во-вторых, указанная схема отражает лишь верхний уровень иерархии показателей комплекса в целом. Каждый из



Рис. 4.1. Показатели, характеризующие уровень качества и возможности тренажеров и тренажерных комплексов



Рис. 4.2. Показатели качества тренажеров и тренажерных комплексов

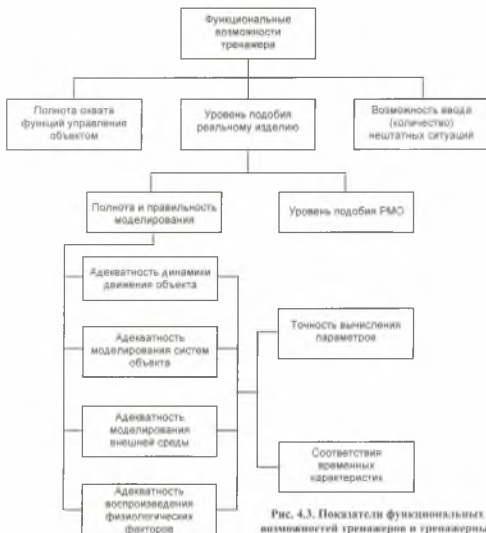


Рис. 4.3. Показатели функциональных возможностей тренажеров и тренажерных комплексов

показателей нижнего уровня в свою очередь определяется рядом факторов, связанных с теми решениями, которые принимаются в процессе создания соответствующих подсистем тренажера.

Уровень качества тренажерного комплекса в целом зависит, естественно, от качества входящих в его состав тренажеров, от организации каналов связи между ними для обеспечения взаимодействия, адекватного реальным условиям совместной работы нескольких экипажей (если

отработка таких навыков предусматривается средствами комплекса), и от сервисных возможностей (организации автоматизированного комплексирования, контроля, резервирования, наличия средств планирования подготовки экипажей на базе средств комплекса, оценки тренированности и готовности операторов к работе на реальных объектах).

С точки зрения обучаемого оператора качество тренажера и его возможности определяются степенью соответствия тре-

нажера тому объекту, которым он должен управлять после завершения подготовки.

Требование обеспечения подобия тренажера штатному объекту, характерное для средств тренажной техники, является одним из самых важных. Заключение оператора, начинающего работать на реальном объекте после завершения его подготовки на тренажерах, о том, что в реальной работе все происходит именно так, как на тренажере, можно считать самой высокой оценкой тренажера.

Для того, чтобы обеспечить адекватность условий деятельности на реальном объекте и на тренажере, нужно обеспечить соответствие интереса рабочей зоны и бортового оборудования (либо заменяющих их макетов или приборов в тренажном исполнении), адекватность наблюдаемой оператором визуальной картины внешней среды, поведения управляемого объекта и других объектов (космической станции, с которой осуществляется стыковка, объектов взаимодействия сил и противника и др.), а также адекватность информационного канала связи экипажа с наземными пунктами управления. Указанные требования в решающей степени определяют состав и характеристики технических и программных средств тренажера.

4.2. ПОКАЗАТЕЛИ АДЕКВАТНОСТИ УСЛОВИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ НА ТРЕНАЖЕРАХ И РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

Под адекватностью понимают достижение подобия между тренажером и реальным объектом, работа которого моделируется в тренажере. Если такое подобие отсутствует, то средствам тренажера могут формироваться у операторов ложные навыки управления объектом, которые могут привести к нарушению правильного порядка действий и к непредсказуемым негативным последствиям. Поэтому достижение адекватности является

одной из самых важных задач разработчика тренажера.

Для обеспечения решения этой задачи необходимо, чтобы в период работы оператора на тренажере у него формировался такой образ, который соответствовал бы, с одной стороны, психическому отражению реального объекта при взаимодействии с ним оператора и, с другой стороны, – нормативно одобренному способу действий по управлению объектом.

Это особенно важно для такой категории операторов, которые не имеют возможности готовиться на реальном объекте, в том числе, космонавтов, летчиков-испытателей, совершающих первый вылет на новом самолете, экипажей подводных лодок и морских кораблей, впервые выходящих в море и других категорий операторов.

Адекватность можно рассматривать как комплексную оценку геометрического, динамического и информационного подобия. Геометрическое подобие комплексного тренажера предполагает соответствие формы и размеров кабины, а также размещаемых в ней технических объектов аналогичным объектам и их параметрам в кабине реального управляемого аппарата. Динамическое подобие тренажера предполагает адекватность моделирования движения объекта средствами тренажера. При одних и тех же управляющих воздействиях динамика эволюций объекта на тренажере и в реальных условиях должны быть идентичны.

Информационное подобие тренажера предполагает идентичность состава, формы и характеристик информации, предъявляемой оператору на тренажере и реальном объекте. В общем случае следует иметь в виду все каналы восприятия информации человеком. Безусловно, основной объем информации в процессе реальной деятельности поступает через зрительный и звуковой анализатор оператора. Однако для некоторых видов операторской деятельности (например, у пилотов) важно адекватно воспроизводить на тре-

нажерах и мышечные нагрузки, и акселерационные ощущения.

Количественные методы оценки адекватности тренажера основываются, как правило, на определении потенциального уровня правильных навыков γ , приобретаемых оператором на тренажере. Будем полагать, что действия оператора на тренажере правильные, если для одного и того же вектора входных воздействий на органы управления x выходные параметры в штатном объекте $\Xi(x)$ и в тренажере $\Xi_S(x)$ практически совпадают.

В качестве оценки степени адекватности тренажера и реального объекта можно использовать [52] следующее выражение:

$$\gamma = \gamma_{\Xi} \gamma_p, \quad (4.1)$$

где $\gamma_{\Xi} = P\{\Xi(x) - \Xi_S(x) \leq (0,1 \dots 0,15)\Xi(x)\}$ – вероятностно-метрическая оценка адекватности информационной модели тренажера; γ_p – условная вероятность адекватности психолого-физиологической имитации условий эксплуатации штатной техники.

Очевидно, что для штатной техники $\gamma = 1$.

Истинные оценки приобретаемых на тренажере навыков уровней: правильных C , ошибочных E , ложных F , пропущенных правильных навыков D , определяют уравнениями [59]:

$$\omega_C = \gamma \omega, \quad (4.2)$$

$$\omega_E = \gamma(1 - \omega), \quad (4.3)$$

$$\omega_F = (1 - \gamma)\omega, \quad (4.4)$$

$$\omega_D = (1 - \gamma)(1 - \omega), \quad (4.5)$$

где ω – уровень навыков, определяемый из анализа действий операторов [139]:

$$\omega = \frac{N_c}{N} = 1 - \frac{N_e}{N}, \quad (4.6)$$

N_c и N_e – количество правильных и ошибочных действий; N – общее количество действий.

Для штатной техники имеет место:

$$\omega_C = \omega, \quad \omega_E = 1 - \omega, \quad \omega_F = 0, \quad \omega_D = 0,$$

следовательно,

$$\omega_C + \omega_E + \omega_F + \omega_D = 1.$$

Это подтверждает справедливость (4.2)–(4.6).

В свою очередь, уровень навыков, приобретаемых за N тренировок на штатной технике, определяется по формуле

$$\omega(N) = 1 - (1 - \omega_0)(1 - \xi_S)^N. \quad (4.7)$$

Из-за частичного или полного отсутствия имитации некоторых процессов и эффектов в тренажере, являющихся в реальных условиях отвлекающими и рассеивающими внимание оператора, возможна такая ситуация, когда доля навыков ξ_S , приобретаемая на тренажере, может оказаться несколько выше, чем доля навыков ξ , приобретаемая на штатной технике. С учетом этого, оценка уровня навыков, приобретаемых на тренажере за n тренировок, имеет вид

$$\omega(n) = 1 - (1 - \omega_0)(1 - \xi_S)^n. \quad (4.8)$$

Подставив (4.8) в (4.2)–(4.6) и проведя некоторые преобразования с учетом того, что если оператор ранее не занимался на тренажере, то начальная оценка уровня $F - (1 - \gamma)\omega_0$, являющаяся следствием ее неадекватности, равна нулю, а начальная оценка уровня $C - \gamma\omega_0$ равна ω_0 , имеем [58]:

$$\omega_C(n) = \gamma - (\gamma - \omega_0)(1 - \xi_S)^n, \quad (4.9)$$

$$\omega_E(n) = (\gamma - \omega_0)(1 - \xi_S)^n, \quad (4.10)$$

$$\omega_F(n) = \bar{\gamma} - \bar{\gamma}(1 - \xi_S)^n, \quad (4.11)$$

$$\omega_D(n) = \bar{\gamma}(1 - \xi_S)^n, \quad (4.12)$$

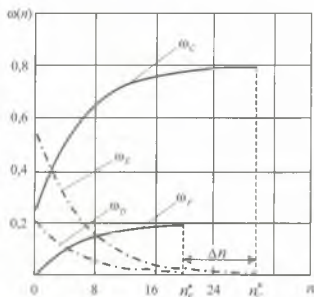


Рис. 4.4. Графики зависимости оценок уровней навыков от числа тренировок

где $\bar{\gamma} = 1 - \gamma$ — вероятность неадекватности тренажера.

На рис. 4.4 для исходных значений $\omega_0 = 0,25$, $\xi_S = 0,09$, $\gamma = 0,8$ представлены графические зависимости оценок уровней навыков, приобретаемых на тренажерах за n тренировок.

С увеличением числа тренировок $\omega_E(n)$ и $\omega_D(n)$ стремятся к нулю; оценки $\omega_C(n)$ и $\omega_F(n)$ стремятся к γ и $\bar{\gamma}$, образуя некоторое "насыщение" в точках n_C^* и n_F^* . Следовательно, $\omega_C(n)$ и $\omega_F(n)$ некоторым образом замещают $\omega_E(n)$ и $\omega_D(n)$ и становятся доминирующими.

Отсюда следует, что после цикла занятий операторов на тренажерах доля навыков ξ , усваиваемая за очередную тренировку на штатной технике, будет направлена на приобретение новых, ранее неизвестных и восстановление старых, ранее приобретенных, но забытых или

пропущенных навыков (так как существуют E и D), а также на ликвидацию ложных навыков F .

Уравнения (4.9) – (4.12) позволяют разрешить конфликт $\mathcal{R}(\omega)$, однако они не могут в явном виде быть использованы для полного разрешения конфликта $\mathcal{R}(N)$. Для этих целей воспользуемся уравнением вещественной функции (4.7). Приняв в нем $\omega_0 = \omega(n)$ и $N = 1$, имеем

$$\xi = \frac{\omega - \omega(n)}{1 - \omega(n)}, \quad (4.13)$$

где $\omega = \omega_C + \omega_F$, $\omega(n) = \omega_C(n) + \omega_F(n)$.

Произведя некоторые преобразования, получаем

$$\xi \left(1 - \frac{\omega_F(n)}{1 - \omega_C(n)} \right) = \frac{\omega_C - \omega_C(n)}{1 - \omega_C(n)} + \frac{\omega_F - \omega_F(n)}{1 - \omega_F(n)} \cdot \frac{1 - \omega_F(n)}{1 - \omega_C(n)}, \quad (4.14)$$

где

$$\frac{\omega_C - \omega_C(n)}{1 - \omega_C(n)} = \xi_C, \quad \frac{\omega_F - \omega_F(n)}{1 - \omega_F(n)} = \xi_F.$$

Соотношение (4.14) можно представить в виде [63, 80]:

$$\begin{aligned} \xi &= \left(1 - \frac{\omega_F(n)}{1 - \omega_C(n)} \cdot \frac{1 - \omega_F(n)}{1 - \omega_C(n)} \right) = \\ &= \xi_C \left(1 - \frac{1 - \omega_F(n)}{1 - \omega_C(n)} \right). \end{aligned} \quad (4.15)$$

После его преобразования с учетом того, что доля навыков ξ_C есть не что иное, как доля навыков ξ_0 , определенная на штатной технике при отсутствии тренировок на тренажере, имеем

$$\xi(n) = \xi_0 \left(1 - \frac{\omega_F(n)}{\omega_C(n)} \right). \quad (4.16)$$

На основании (4.16) соотношение (4.4) примет вид

$$N(n) = \frac{\ln(1 - \omega_C) - \ln(1 - \omega_C(n))}{\ln \left(1 - \xi_0 \left(1 - \frac{\omega_F(n)}{\omega_C(n)} \right) \right)} \quad (4.17)$$

Существование ошибки $\Delta N(n) = N(n) - N$ является подтверждением существования конфликта $\mathfrak{N}(N)$ между принятыми и действительно необходимыми планами проведения тренировок на штатной технике после занятий на тренажере.

На рис. 4.5 и 4.6 представлены графические зависимости $\xi(n)$ и $\Delta N(n)$ от количества предшествующих тренировок n на тренажере при ранее принятых исходных данных в дополнении, что $\omega_D = 0,92$.

Из этих графиков следует, что при увеличении n зависимости $\xi(n)$ и $\Delta N(n)$ стремятся к некоторому устойчивому состоянию.

Таким образом, совместное использование соотношений (4.9), (4.11) и (4.17) разрешает конфликт $\mathfrak{N}(N)$.

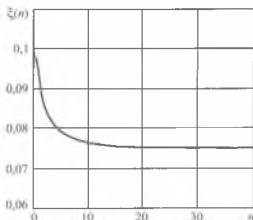


Рис. 4.5. График зависимости доли усваиваемых навыков от числа предшествующих тренировок

При оценке адекватности тренажеров традиционно используются статистические критерии. Согласно соотношению (4.1) математическая задача оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах объектов формулируется как задача оценки вероятности предположения о том, что значения имитируемых выходных информационных параметров $\Xi_S(x)$ тренажера отличаются от значений реальных выходных информационных параметров $\Xi(x)$ штатной техники при решении единых задач не более, чем на $\{0,1 \dots 0,15\} \Xi(x)$.

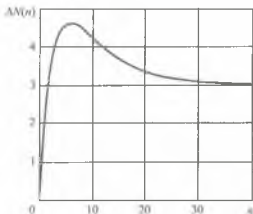


Рис. 4.6. Зависимость ошибки оценки доли усваиваемых навыков от числа тренировок

В настоящее время оценка адекватности имитационного моделирования обычно сводится только к проверке выполнения условия [126]

$$|W_i(x) - W_m(x)| = \varepsilon_i \leq \varepsilon^*, \quad (4.18)$$

где $W_i(x)$ и $W_m(x)$ – совокупность экспериментальных данных (откликов), соответственно, объекта и модели; $i = 1, 2, \dots, n$ – количество экспериментов (испытаний); ε^* – точность имитационного моделирования.

В нашем случае в соответствии с соотношением (4.6):

$$W_i(x) = \Xi_i(x), \quad W_m(x) = \Xi_{Si}(x), \\ \varepsilon^* = \{0, 1 \dots 0,15\} W_i(x).$$

Данная проверка производится с помощью статистических критериев [110].

Так, например, при использовании критерия Фишера проверяется только предположение о несмещенности выборочного среднего

$$M(\varepsilon) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (4.19)$$

и приемлемом разбросе между выборочной дисперсией

$$S^2(\varepsilon) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - M(\varepsilon))^2 \quad (4.20)$$

и дисперсией ошибки эксперимента $\sigma^2(W)$. Для корректной модели $M(\varepsilon) = 0$ соотношение (4.20) принимает вид

$$S^2(\varepsilon) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i(x) - W_m(x))^2. \quad (4.21)$$

Задача оценки адекватности при этом формулируется следующим образом: если дисперсия $\sigma^2(W)$, характеризующая ошибку эксперимента известна, то величина $S^2(\varepsilon)$ может быть использована для оценки адекватности модели действительности с помощью F -отношения:

$$F_{f_s, \infty} = \frac{S^2(\varepsilon)}{\sigma^2(W)}, \quad (4.22)$$

где $f_s = n - 1$ – число степеней свободы.

Полученную величину F -отношения сравнивают с критическим (пороговым) значением Фишера $F_{f_s, \alpha, \infty}$ при соответствующих числах степеней свободы и уровне значимости α [78]:

$$\alpha = \frac{(f_s/2)^{f_s/2}}{\Gamma(f_s/2)} \int_0^{f_s/2-1} e^{-y} y^{f_s/2-1} dy, \quad (4.23)$$

где $\Gamma(f_s/2)$ – значение гаммы-функции.

При

$$F_{f_s, \infty} \leq F_{f_s, \alpha, \infty}, \quad (4.24)$$

полученная величина $S^2(\varepsilon)$ может быть объяснена случайным разбросом экспериментальных данных и, следовательно, нет оснований для отказа от проверяемой модели.

Если

$$F_{f_s, \infty} > F_{f_s, \alpha, \infty},$$

то полученное расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных значимо, следовательно, модель должна быть отвергнута.

При использовании критерия Хи-квадрат, как правило, проверке подлежит гипотеза о том, что оцениваемая имитационная модель адекватна исследуемому реальному объекту с заданной вероятностью и заданной точностью ε^* , т.е. согласно (4.1) с заданной вероятностью адекватности (например, $\gamma = 0,95$). Это значит, что для n независимых испытаний γn должно удовлетворять условию (4.18) ($\varepsilon_i \leq \varepsilon^*$) и лишь в $(1 - \gamma)n$ случаях это условие может быть нарушено. В результате случайного эксперимента для этих событий будут получены частоты v_1 и v_2 :

$$v_1 \approx \gamma n; \quad v_2 \approx (1 - \gamma)n; \quad v_1 + v_2 = n.$$

Для оценки предположения о том, что отклонения v_1 и v_2 от соответствующих вероятностей случайны, строится функция

$$U^* = \frac{(v_1 - \gamma n)^2}{\gamma n} + \frac{(v_2 - (1 - \gamma)n)^2}{(1 - \gamma)n}. \quad (4.25)$$

Полученное значение U^* сравнивают с критическим (пороговым) значением $\chi^2_{1,\alpha}$ [142] критерия Хи-квадрат, которое зависит от уровня значимости α :

$$\alpha = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\frac{2}{\chi^2_{1,\alpha}}} y^{1/2} e^{-y/2} dy. \quad (4.26)$$

Если выполняется условие

$$U^* > \chi^2_{1,\alpha}, \quad (4.27)$$

то модель должна быть отвергнута. А если

$$U^* \leq \chi^2_{1,\alpha}, \quad (4.28)$$

то экспериментальные данные не противоречат гипотезе об адекватности модели.

Критерии Фишера и согласия Хи-квадрат имеют один и тот же недостаток, а именно — оценка адекватности носит размытый характер. Однако, в отличие от критерия Фишера критерий Хи-квадрат в представленном виде может определить не только факт адекватности или неадекватности имитационной модели объекту, но и факт того, что модель адекватна или неадекватна при заданной вероятности адекватности. Но использовать критерий Хи-квадрат в непосредственной форме (4.25)–(4.28) для оценки вероятности адекватности имитационного моделирования в тренажерах объектов представляется невозможным.

Для оценки вероятности адекватности (4.1) критерий Хи-квадрат можно привести к необходимому для этого виду. Воспользуемся равенством (4.25) и условием (4.28) о том, что оцениваемая модель адекватна объекту

$$\frac{(v_1 - \gamma n)^2}{\gamma n} + \frac{(v_2 - (1 - \gamma)n)^2}{(1 - \gamma)n} \leq \chi^2_{1,\alpha}. \quad (4.29)$$

Учитывая, что $v_1 + v_2 = n$, решением неравенства (4.29) являются граничные значения вероятности адекватности [52]:

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n - 2v_1}{n + \chi^2_{1,\alpha}} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{n - 2v_1}{n + \chi^2_{1,\alpha}} - 1 \right)^2 - \frac{v_1^2}{n(n + \chi^2_{1,\alpha})}}. \quad (4.30)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n - 2v_1}{n + \chi^2_{1,\alpha}} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{n - 2v_1}{n + \chi^2_{1,\alpha}} - 1 \right)^2 - \frac{v_1^2}{n(n + \chi^2_{1,\alpha})}}, \quad (4.31)$$

а вероятность адекватности может принимать значения

$$\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2.$$

Вероятность адекватности имитационной модели объекту можно представить в виде

$$\gamma = \gamma^* \pm \beta, \quad (4.32)$$

где

$$\gamma^* = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n - 2v_1}{n + \chi^2_{1,\alpha}} \right), \quad (4.33)$$

$$\beta = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{n - 2v_1}{n + \chi^2_{1,\alpha}} - 1 \right)^2 - \frac{v_1^2}{n(n + \chi^2_{1,\alpha})}}. \quad (4.34)$$

На рис. 4.7 представлены графические зависимости для граничных вероятностей γ_1 и γ_2 , а также оценки γ^* от v_1/n .

Согласно рис. 4.8 имеем, что для любого числа испытаний n ошибка β принимает максимальное значение при $v_1/n = 0,5$.

На основании соотношения (4.34) для конкретных значений ошибки β оцен-

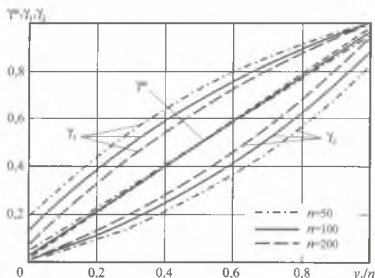


Рис. 4.7. Графики оценок и граничных вероятностей адекватности

ки адекватности и уровня значимости α (4.26) в табл. 4.1 определено достаточное (максимальное) число испытаний $n_{\max}$ (при $v_1/n = 0,5$). Необходимое (минимальное) число экспериментов $n_{\min}$ для соответствующих значений β и α представлено в табл. 4.2 (при $v_1/n = 1$).

Критерий согласия Хи-квадрат в несколько преобразованном виде позволяет произвести вероятностно-метрическую оценку адекватности результатов имитационного моделирования действительности. Однако, как для критерия Хи-квадрат, так и для критерия Фишера имеется ос-

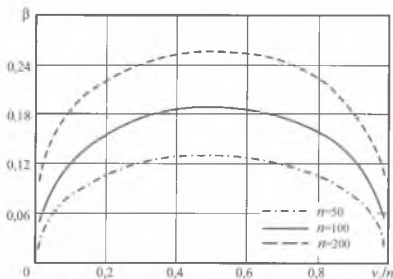


Рис. 4.8. Графики ошибок оценки вероятности адекватности

4.1. Достаточное количество испытаний

β	α			
	0,1	0,05	0,02	0,01
0,1	49	70	90	119
0,05	193	280	367	484
0,025	779	1150	1446	1909
0,01	2115	2998	3918	5257

новной недостаток, заключающийся в правильности выбора уровня значимости α . Как правило, выбор уровня значимости α производится экспертным путем и не всегда обоснован (носит субъективный характер) [23]. А от выбора α , в свою очередь, зависит конечный результат оценки адекватности. Поэтому возникает необходимость в объективной оценке α , а на основании этого и оценки адекватности проверяемой модели.

Так как пороговые значения $F_{f, \alpha, \infty}$ (4.23) и $\chi^2_{1-\alpha}$ (4.26), как для критерия Фишера, так и для критерия Хи-квадрат, зависят от уровня значимости α , то эти критерии можно объединить по общему для них параметру α . Объединение критериев Фишера и Хи-квадрат способствует выполнению совместной оценки вероятности адекватности результатов имитационного моделирования действительности. Совместная оценка заключается в том, что критерий Фишера в качестве "предварительной" оценки модели позволяет получить уточненное значение уровня значи-

4.2. Достаточное количество испытаний

β	α			
	0,1	0,05	0,02	0,01
0,1	11	15	20	26
0,05	24	34	45	65
0,025	51	74	94	125
0,01	85	125	158	208

мости α^* , а критерий Хи-квадрат (на основании α^*) в качестве "детальной" оценки – значение вероятности γ .

Процедура оценки вероятности ϵ -адекватности результатов имитационного моделирования по обобщенному критерию Фишера–Хи-квадрат имеет следующий вид [55]:

1) для заданных значений $\beta_{\text{зад}}$ и $\alpha_{\text{зад}}$ определяется $n_{pr} = n_{\text{мин}}$ (pr – априорное);

2) на основании n_{pr} экспериментальных данных определяется по соотношению (4.21) выборочная дисперсия $S^2(\epsilon)$, а также значение частоты v_{1pr} (sp – апостериорное) выполнения условия (4.18);

3) по выражению (4.22) определяется отношение $F_{f, \alpha, \infty}$ выборочной дисперсии $S^2(\epsilon)$ к дисперсии ошибки эксперимента $\sigma^2(W)$ и оно сравнивается с критическим значением $F_{f, \alpha, \infty}$ (4.23);

4) если $F_{f, \alpha, \infty} \leq F_{f, \alpha, \infty}$, то полученная величина $S^2(\epsilon)$ может быть объяснена случайным разбросом экспериментальных данных, следовательно, нет оснований для отказа от оцениваемой модели (в противном случае, модель забраковывается);

5) принимая, что $F_{f, \alpha, \infty} = F_{f, \alpha^*, \infty} = F_{f, \alpha, \infty}$, по соотношению (4.23) вычисляется уточненное значение уровня значимости α^* , на основании которого по соотношению (4.26) определяется критическое значение $\chi^2_{1-\alpha^*}$ критерия Хи-квадрат;

6) для ранее определенных значений v_{1pr} и $\chi^2_{1-\alpha^*}$ по соотношениям (4.33) и (4.34) определяется, соответственно, оценка вероятности адекватности γ^* и ее погрешность β_{pr} ;

7) если $\beta_{pr} \geq \beta_{\text{зад}}$, то в качестве оценки адекватности принимается $\gamma = \gamma^* \pm \beta_{pr}$;

8) если $\beta_{pr} < \beta_{\text{зад}}$ и заданная рациональная вероятность ϵ -адекватности $\gamma_{\text{рац}}$ (вероятность, при которой имитационная модель имеет еще практическую ценность) находится в пределах $\gamma = \gamma^* \pm \beta_{pr}$, то

по соотношению (4.33) рассчитывается дополнительное количество испытаний для значений $v_{1гр}$, $\beta_{зад}$ и α , до тех пор, пока $\beta_{гр} < \beta_{зад}$.

Очевидно, вследствие универсальности представления обобщенный критерий для оценки адекватности имитационного моделирования может явиться основой для сертификации других средств, где используется имитационное моделирование.

Математический аппарат оценки адекватности может использоваться при определении количества тренировок, достаточного для приобретения необходимых навыков.

Выше принималось, что используемая в (4.2)–(4.5) оценка адекватности у тренажера изначально определяется без ошибок β . Однако в действительности оценка адекватности у тренажера может иметь различные погрешности [52]. Вероятно, что наличие ошибок β может привести к формированию вторичного конфликта $\mathcal{H}(N)$, являющегося следствием издержек по устранению начального конфликта планирования $\mathcal{H}(N)$ [56].

Сущность формирования вторичного конфликта $\mathcal{H}(N)$ из-за ошибок β оценки адекватности у тренажеров ранее не исследовалась. Поэтому актуальным является рассмотрение этого вопроса в интересах корректного планирования тренажерной подготовки операторов.

Известно, что с помощью статистического критерия Хи-квадрат на основании n экспериментальных данных $\Xi(x)$, $\Xi_x(x)$ и заданного уровня значимости α по частоте v_i выполнения условия (4.1) согласно с граничными вероятностями адекватности (4.30) и (4.31) определяется оценка адекватности тренажера γ^* и ее ошибка β соответственно по соотношениям (4.33), (4.34).

Ошибка β , в свою очередь, порождает ошибки прогнозирования как навыков (4.9) и (4.10) на тренажере, так и количества тренировок (4.4) на штатной технике. С учетом этого, справедливы следующие соотношения:

$$\omega_C(n) = \omega_C^*(n) \pm \delta \omega_C(n), \quad (4.35)$$

$$\omega_F(n) = \omega_F^*(n) \pm \delta \omega_F(n), \quad (4.36)$$

$$N(n) = N^*(n) \pm \delta N(n), \quad (4.37)$$

где

$$\omega_C^*(n) = \frac{\omega_C(n, \gamma_1) + \omega_C(n, \gamma_2)}{2}, \quad (4.38)$$

$$\delta \omega_C(n) = \frac{\omega_C(n, \gamma_2) - \omega_C(n, \gamma_1)}{2}.$$

$$\omega_F^*(n) = \frac{\omega_F(n, \gamma_1) + \omega_F(n, \gamma_2)}{2}, \quad (4.39)$$

$$\delta \omega_F(n) = \frac{\omega_F(n, \gamma_2) - \omega_F(n, \gamma_1)}{2}.$$

$$N^*(n) = \frac{N(n, \gamma_1) + N(n, \gamma_2)}{2}, \quad (4.40)$$

$$\delta N(n) = \frac{N(n, \gamma_2) - N(n, \gamma_1)}{2}.$$

На рис 4.9 и рис 4.10 представлены графические зависимости соответственно $\delta \omega_C(n)$, $\delta \omega_F(n)$ и $N(n, \gamma_1)$, $N(n, \gamma_2)$, $N^*(n)$, $\delta N(n)$ от числа предшествующих тренировок n на тренажере при ранее принятых исходных данных и дополнительно: $\gamma^* = 0,8$, $\beta = 0,1 \Rightarrow \gamma_1 = \gamma^* + \beta = 0,9$, $\gamma_2 = \gamma^* - \beta = 0,7$.

Из рис. 4.9 и 4.10 следует, что при увеличении числа тренировок на тренажере, наряду с увеличением $\delta \omega_C(n)$ и $\delta \omega_F(n)$, увеличивается $\delta N(n)$. Причем, $\delta \omega_C(n) = \delta \omega_F(n)$.

С учетом γ_1 и γ_2 мера конфликта $\mathcal{H}(N)$ определяется как

$$\Delta N(n, \gamma_1) = N(n, \gamma_1) - N, \quad (4.41)$$

$$\Delta N(n, \gamma_2) = N(n, \gamma_2) - N. \quad (4.42)$$

В свою очередь на основании (4.41) и (4.42) имеем, что

$$\Delta N(n) = \Delta N^*(n) \pm \delta \Delta N(n), \quad (4.43)$$

где

$$\Delta N^*(n) = \frac{\Delta N(n, \gamma_1) + \Delta N(n, \gamma_2)}{2}, \quad (4.44)$$

$$\delta \Delta N(n) = \frac{|\Delta N(n, \gamma_2) - \Delta N(n, \gamma_1)|}{2}.$$

Очевидно, что величина $\delta \Delta N(n)$ — мера вторичного конфликта $\mathfrak{R}'(N)$, т.е.

$$\mathfrak{R}'(N) = \delta \Delta N(n). \quad (4.45)$$

На рис. 4.11 представлены графические зависимости соответственно $\Delta N(n, \gamma_1)$, $\Delta N(n, \gamma_2)$, $\Delta N^*(n)$ и $\delta \Delta N(n)$ от количества предшествующих тренировок n на тренажере при ранее принятых исходных данных.

Из рис. 4.11 следует, что наличие вторичного конфликта $\mathfrak{R}'(N)$ может приводить либо к занижению, либо завышению планов тренажерной подготовки. В первом случае не обеспечивается заданный уровень подготовки операторов, во втором — дополнительно расходуются средства на их подготовку.

Таким образом, из-за наличия ошибок β в оценке адекватности γ тренажера, соответственно, и вторичного конфликта $\mathfrak{R}'(N)$ нет возможности полностью разрешить существующий конфликт планирования $\mathfrak{R}(N)$. Из анализа представленного критерия оценки адекватности тренажера следует, что уменьшение вторичного конфликта $\mathfrak{R}'(N)$ возможно за счет увеличения количества k экспериментальных данных при объективном выборе уровня значимости α [52].

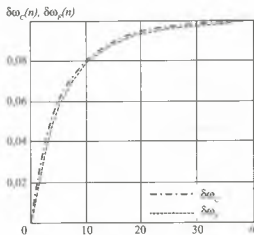


Рис. 4.9. Графики зависимости приобретаемых навыков от числа тренировок

Рассмотрим способы уменьшения вторичных конфликтов. Как правило, оценка адекватности имитационного моделирования в тренажерах сводится только к проверке выполнения условия (4.18).

Обычно данная проверка производится с помощью статистических критериев, например, Хи-квадрат, Фишера. При использовании этих критериев предполагается, что распределение выборки $\{\varepsilon_i\}_k$ описывается нормальным законом, что не всегда верно. Поэтому могут возникать

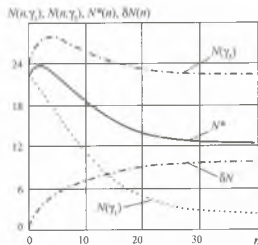


Рис. 4.10. Кривые числа тренировок

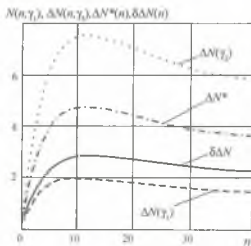


Рис. 4.11. Графики зависимости вторичных конфликтов планирования от числа тренировок

дополнительные ошибки в оценке адекватности информационного обеспечения тренажеров. А это может привести к увеличению ошибок $\delta\omega_c(n)$, $\delta\omega_f(n)$ и $\delta N(n)$, а значит и вторичного конфликта $\mathcal{R}'(N)$.

Для разрешения этой проблемы предлагается производить оценку адекватности информационного обеспечения тренажера в следующем виде [65]:

$$\gamma_{\Sigma} = \int_0^1 p(\epsilon) d\epsilon, \quad (4.46)$$

где

$$p(\epsilon) = \frac{2hb^2\epsilon^{2a-1}}{\Gamma(a/h)} \exp(-b\epsilon^{2a}) \quad (4.47)$$

– обобщенный закон распределения; $\Gamma(a/h)$ – гамма-функция; $h > 0$, $a > 0$ – параметры формы, $b > 0$ – параметр масштаба.

Значения параметров a , h и b могут быть определены из соотношений:

$$\frac{2m_{4h}(m_{4h} - m_{2h}^2)}{m_{2h}(m_{6h} - m_{2h}m_{4h})} = 1,$$

$$a = \frac{hm_{2h}^2}{m_{4h} - m_{2h}^2}, \quad b = \left(\frac{m_{2h}^2}{m_{4h} - m_{2h}^2} \right)^2, \quad (4.48)$$

где m_{2h} , m_{4h} и m_{6h} – начальные моменты соответственно $2h$, $4h$ и $6h$ -порядка

$$m_{2h} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \epsilon_i^{2h}, \quad m_{4h} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \epsilon_i^{4h},$$

$$m_{6h} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \epsilon_i^{6h}.$$

Очевидно, что если $c = 1$ и $\alpha = 0,5$, то $p(\epsilon)$ является односторонним нормальным законом и в соответствии с этим можно воспользоваться для оценки вероятности адекватности тренажера модернизированным критерием Хи-квадрат, позволяющим определить ее усредненное значение (4.33) и ошибку (4.34).

Если $c \neq 1$ и $\alpha \neq 0,5$, то для оценки вероятности адекватности информационного обеспечения тренажера целесообразно воспользоваться (4.46). Однако при этом необходимо помнить, что возможны ошибки интегрирования.

Соотношения (4.9)–(4.12), используемые в автоматизированной системе планирования тренажной подготовки, хотя и являются основой для разрешения конфликтов планирования $\mathcal{R}(N)$, однако из-за ошибок β оценки γ адекватности тренажеров формируют вторичные конфликты $\mathcal{R}'(N)$, которые приводят либо к подготовке операторов до уровня ниже заданного, либо к дополнительным расходам.

Сделанные предложения по снижению вторичных конфликтов $\mathcal{R}'(N)$ не устраняют их полностью. Поэтому в целях гарантируемой подготовки операторов с использованием тренажера и штатной техники целесообразно в соотношениях (4.9)–(4.12) принимать, что $\gamma = \gamma_2 = \gamma^* + \beta$, хотя это приводит к дополнительным расходам.

Данные расходы можно существенно уменьшить за счет увеличения количества экспериментальных данных, используемых для оценки адекватности тренажера. При этом необходимо учитывать экономическую целесообразность такой процедуры. Возможно, что объем затрат, направленных на получение экспериментальных данных, может значительно превышать объем затрат, необходимых для проведения дополнительных тренировок. Необходимо также помнить, что сами экспериментальные данные по существу являются лишь базовым материалом для оценки адекватности тренажера, а от корректности его обработки зависит конечная ее точность.

4.3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ТРЕНАЖЕРАХ

4.3.1. Базовый метод оценки адекватности моделирования

Для оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах структуру тренажера представим в виде, показанном на рис 4.12, где $x(t)$ – вектор воздействий оператора на органы управления в момент времени t ; $\Xi_m(x)$ – имитируемое информационное поле средствами индикации; W_{mj} – входной сигнал имитационной модели; W_m – отклик имитационной модели.

Будем считать, что в тренажере используются реальные рабочие места операторов (реальные средства индикации и органы управления объекта). Поэтому результирующая адекватность такого тренажера будет зависеть только от адекватности имитационной модели объекта.

Для исследователя адекватности тренажера имитационная модель объекта может выступать в роли либо "белого", либо "серого", либо "черного" ящика [54].

Так, под "белым" ящиком следует понимать имитационную модель объекта с известной структурой описания модели и самого объекта, под "серым" ящиком – с частично известной структурой описания, под "черным" ящиком – с неизвестной структурой описания.

Очевидным является, что наличие такой разновидности структуры описания объектов и их имитационных моделей должно накладывать специфические особенности на механизм проведения исследований адекватности имитационного моделирования в тренажерах.

Далее определим эти особенности для вероятностно-метрической оценки адекватности имитационного моделирования, соответственно "черного" и "белого" ящиков.

Пусть исследователю доступны только статистические данные реального вектора воздействий $x(t)$ и информационного поля $\Xi(x)$ объекта. На основании статистических данных реального вектора воздействий $x(t)$ исследователь с помощью имитационной модели получает статистические данные имитируемого информационного поля $\Xi_m(x)$ тренажера. С учетом этого оценка адекватности имитационной модели в тренажере возможна лишь на основании сопоставления доступных и получаемых исследователем статистических данных $\Xi(x)$ и $\Xi_m(x)$ (рис. 4.13).

При заданных ограничениях необходимо определить возможности вероятностно-метрической оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах.

Информационное поле $\Xi(x)$ объекта можно представить в виде следующего функционала:

$$\Xi(x) = \Phi(\Xi_1(x), \Xi_2(x), \dots, \Xi_m(x), \Xi_n(x)), \quad (4.49)$$

где $\Xi_m(x)$ – информационное поле m -го средства индикации; M – число средств индикации.



Рис. 4.12. Структура виртуального тренажера

В качестве средств индикации в объектах могут использоваться: стрелочные и цифровые, световые, электронно-лучевые, звуковые, речевые и другие индикаторы [9].

В зависимости от продолжительности T_m времени наблюдения оператора за информационным полем $\Xi_m(x)$ m -го средства индикации и длительности τ_m времени, в течение которого оно остается либо неизменными, либо изменяется монотонно, его можно разбить на две группы:

1) если $T_m \leq \tau_m$, то $\Xi_m(x)$ непрерывной структуры $(\Xi_m(x))$;

2) если $T_m > \tau_m$, то $\Xi_m(x)$ скачкообразной структуры $(\Xi_m(x))$.

Адекватность информационного поля непрерывной структуры $\Xi_m(x)$ m -го индикаторного средства действительности определяется как

$$\gamma(\Xi_m(x)) = P\left[|\Xi_m(x) - \Xi_{im}(x)| \leq \leq \{0,1 \dots 0,15\} \Xi_m(x)\right], \quad (4.50)$$

где $\Xi_{im}(x)$ – имитируемое информационное поле m -го индикаторного средства.

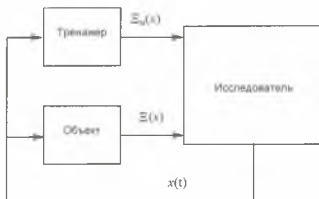


Рис. 4.13. Представление виртуального тренажа в виде "черного ящика"

Адекватность информационного поля скачкообразной структуры $\Xi_m(x)$ m -го индикаторного средства действительности зависит от времени начала t_m и длительности τ_m его индикации (t_m зависит от времени t_m). С учетом этого имеем

$$\gamma(\Xi_m(x)) = \gamma(\Xi_m(x)) \gamma(t_m(x)/\Xi_m(x)) \times \gamma(\tau_m(x)/t_m(x)), \quad (4.51)$$

где $\gamma(t_m(x)/\Xi_m(x))$ и $\gamma(\tau_m(x)/t_m(x))$ – условные адекватности синхронизации индикации скачкообразной информации, которую в течение промежутка времени τ_m можно считать непрерывной:

$$\gamma(t_m(x)/\Xi_m(x)) = P[t_m(\Xi_m(x)) - t_{m\pi}(\Xi_m(x)) = 0], \quad (4.52)$$

$$\gamma(\tau_m(x)/t_m(x)) = P[\tau_m(t_m(x)) - \tau_{m\pi}(t_m(x)) = 0]. \quad (4.53)$$

Здесь $t_{m\pi}(\Xi_m(x))$ и $\tau_{m\pi}(t_m(x))$ – соответственно начало и длительность имитации информационного поля $\Xi_m(x)$ m -го индикаторного средства.

В соответствии с (4.49) и с учетом соотношений (4.51) и (4.52) адекватность имитации информационного поля в тренажере можно представить в виде

$$\begin{aligned} \gamma(\Xi(x)) &= \sum_{m=1}^M \bar{b}_m \gamma(\Xi_m(x)) + \sum_{n=1}^M \tilde{b}_n \gamma(\Xi_n(x)) + \\ &+ \sum_{n=2}^M \sum_{m=1}^M \bar{b}_{mn} \gamma(\Xi_m(x)) \gamma(\Xi_n(x)) + \\ &+ \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \tilde{b}_{mn} \gamma(\Xi_m(x)) \gamma(\Xi_n(x)) + \\ &+ \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \bar{\tilde{b}}_{mn} \gamma(\Xi_m(x)) \gamma(\Xi_n(x)). \end{aligned} \quad (4.54)$$

где $\bar{b}_m$, $\tilde{b}_n$, $\bar{b}_{mn}$, $\tilde{b}_{mn}$ – весовые коэффициенты.

Причем

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \bar{b}_m + \sum_{n=1}^M \tilde{b}_n + \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \bar{b}_{mn} + \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \tilde{b}_{mn} + \\ + \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \bar{\tilde{b}}_{mn} = 1. \end{aligned}$$

Весовые коэффициенты характеризуют степень значимости информационных полей различных структур при решении конкретных задач применения объектов. Они могут определяться экспериментально (например, на основании экспертного анализа [23]) или(и) аналитически (например, на основании регрессионного анализа [131]).

Для независимых информационных полей непрерывной и скачкообразной структур соответствующих средств индикации: $\bar{b}_{mn} = 0$, $\tilde{b}_{mn} = 0$, $\bar{\tilde{b}}_{mn} = 0$. Следовательно, из соотношения (4.54) имеем, что адекватность информационного поля $\Xi_m(x)$ тренажера объекта действительно будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \gamma(\Xi(x)) &= \sum_{m=1}^M \bar{b}_m \gamma(\Xi_m(x)) + \sum_{n=1}^M \tilde{b}_n \gamma(\Xi_n(x)), \\ \sum_{m=1}^M \bar{b}_m + \sum_{n=1}^M \tilde{b}_n &= 1. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Рассмотрим особенности оценки адекватности имитации информационных полей наиболее распространенных индикаторных средств объектов.

Стрелочные индикаторы информируют о значениях контролируемых параметров объекта в соответствии с углом отклонения стрелки индикаторного прибора относительно измерительной шкалы (например, о значениях питающего напряжения конкретного блока, силе тока магнетрона передатчика и т.п.). В зависимости от структуры информационного

поля адекватность имитации стрелочных индикаторов может оцениваться либо в форме (4.50), либо в форме (4.51).

Алфавитно-цифровые индикаторы информируют о значениях контролируемых параметров объекта в соответствии с высвечивающимися буквами и цифрами (например, дальность и азимут до цели, частота радиолинии и т.п.).

Такие индикаторы имеют скачкообразную структуру информационных параметров (изменение цифр и букв происходит скачкообразно). Очевидным является, что пользоваться в явном виде (4.51) не совсем корректно. В некоторых случаях изменения цифры или буквы в пределах до 15 % может привести к изменению их смысловой нагрузки. Например, должна быть буква "Л", а имитируется буква "Г", или должна быть цифра "6", а имитируется "5", или должна быть буква "О", а имитируется цифра "0". Поэтому для избежания таких недоразумений в (4.51) необходимо принять

$$\gamma(\Xi_m(x)) = P[\Xi_m(x) - \Xi_{\text{им}}(x) = 0]. \quad (4.56)$$

Световые индикаторы информируют об особых ситуациях, возникающих в процессе эксплуатации объектов (например, включение высокого напряжения, переход на резервный блок и т.п.). Степень важности ситуации может соответствовать определенному цвет светового индикатора (например, красный – опасно, желтый – внимание, зеленый – норма). Эти индикаторы, так же, как и алфавитно-цифровые, характеризуются информационными параметрами скачкообразной структуры (включение и выключение светового индикатора происходит скачкообразно).

В некоторых случаях изменения параметров цвета индикатора в пределах до 15 % может привести к изменению его смысловой нагрузки. Например, должен быть цвет "желтый", а имитируется цвет "зеленый". Поэтому для избежания таких недоразумений в (4.50) в качестве

$\gamma(\Xi_m(x))$ необходимо принять (4.56). Если же в тренажере используются реальные световые индикаторы постоянного цвета, то $\gamma(\Xi_m(x)) = 1$. С учетом этого имеем

$$\gamma(\Xi_m(x)) = \gamma(t_m(x)/\Xi_m(x))\gamma(t_m(x)/t_m(x)). \quad (4.57)$$

Звуковые и речевые индикаторы обеспечивают информацию, соответствующую целевому взаимодействию объектов с окружающей средой (например, прием речевых сообщений от объектов среды, включение зуммера при пропадании цели и т.д.). Помимо этого подобные индикаторы информируют об особых ситуациях, возникающих в процессе эксплуатации. Эта информация может быть в виде либо звукового сигнала тревоги (например, пропадание высокого напряжения, пожар в аппаратуре и т.п.), либо только речевого сигнала тревоги (например, "цель не опознана"), либо речевого сигнала с подсказкой оператору о его действиях (например, "вас прослушивают – перейдите на другую радиочастоту").

Так как искажение звуковых и речевых сигналов до 15 % не нарушает их информативной смысловой нагрузки, и они имеют скачкообразную структуру (либо есть звуковой сигнал, либо его нет), то для оценки адекватности их имитации в тренажере можно воспользоваться соотношением (4.51).

Электронно-лучевые индикаторы являются наиболее сложными средствами индикации и обеспечивают различного рода визуальной информацией в зависимости от целевого назначения объектов (о спектре радиосигналов – в станциях радиотехнической разведки, о воздушной обстановке – в радиолокационных станциях, об оптическом изображении предметов окружающей среды – в телевизионных, тепловизионных станциях и т.п.). Информационное поле этих индикаторов образуется из совместной совокупности

как непрерывных, так и скачкообразных информационных параметров. Поэтому адекватность имитации информационного поля этих индикаторов может быть получена по аналогии с соотношением (4.54).

При этом в качестве $\Xi_m(x)$ и $\Xi_m(x)$ может использоваться информационное поле от m -й элементарной площади S_m экрана электронно-лучевого индикатора. Под S_m можно понимать минимальную площадь изображения, еще воспринимаемую человеческим глазом и являющуюся базисом для его формирования (зависит от расстояния между оператором и экраном индикатора, индивидуальных особенностей оператора). Известно, что основой формирования изображения на экране электронно-лучевых индикаторов являются электронные лучи. Электронный луч на поверхности экрана характеризуется площадью свечения S_c . Очевидно, что если $S_c < S_m$, то $S_m = \cup S_c$, где S_c – i -я площадь свечения. Если же $S_c > S_m$, то $S_m = S_c$.

Элементарная площадь S_m обладает схожими свойствами светового и стрелочного индикаторов, характеризующими адекватность их имитации.

Свойства светового индикатора выражены в свечении $\forall S_m$ либо постоянным (для монохромных электронно-лучевых индикаторов), либо переменным цветом (для цветных электронно-лучевых индикаторов).

Свойства стрелочного индикатора выражены в месторасположении S_m на поверхности экрана, которое в зависимости от формы экрана удобно определять в прямоугольной системе координат для прямоугольных и квадратных экранов и в полярной – для круглых, эллиптических экранов.

С учетом этого для оценки адекватности имитации информационного поля непрерывной структуры $\Xi_m(x)$ можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\gamma(\Xi_m(x)) = \gamma(C_m(x))\gamma(X_m(x))\gamma(Y_m(x)), \quad (4.58)$$

где $C_m(x)$ – цвет свечения S_m ; $X_m(x)$ и $Y_m(x)$ – координаты центра S_m на поверхности экрана ($C_m(x)$, $X_m(x)$, $Y_m(x)$ – независимые информационные параметры S_m).

Причем адекватность имитации координат $\gamma(X_m(x))$ и $\gamma(Y_m(x))$ местоположения элементарной площади S_m на экране определяется в форме (4.51), адекватность имитации цвета ее свечения $\gamma(C_m(x))$ – (4.57).

В свою очередь оценка адекватности имитации информационного поля скачкообразной структуры $\Xi_m(x)$ определяется по соотношению (4.51) с учетом (4.58).

Таким образом, на основании (4.37), учитывая особенности количественной оценки адекватности $\gamma(\Xi_m(x))$ и $\gamma(\Xi_m(x))$ имитируемых информационных полей средств индикации, используемых в тренажерах в зависимости от их структуры ($\Xi_{um}(x)$) или ($\Xi_{um}(x)$), можно определить результирующую оценку адекватности $\gamma(\Xi(x))$ всего информационного поля тренажера $\Xi_m(x)$ по отношению к действительности $\Xi(x)$:

$$\gamma(\Xi(x)) = P[\Xi(x) - \Xi_m(x) \in \{0, 1 \dots 0, 15\} \Xi(x)]. \quad (4.59)$$

Сами оценки адекватности в форме (4.50), (4.52), (4.53), (4.56) можно выполнить на основании использования ранее рассмотренных статистических критериев.

Очевидно, что если в качестве средств индикации и органов управления используются не реальные устройства (имитаторы), например, на экране дисплея компьютера, то оценка адекватности информационного поля Ξ^* имитируемых информационных средств будет определяться в следующем виде:

$$\gamma(\Xi(x')) = \gamma(\Xi(x)) \gamma(\Xi(x')/\Xi(x)) \times \gamma(x'/\Xi(x)) \gamma(x'/x), \quad (4.60)$$

где $\gamma(\Xi(x')/\Xi(x))$ – условная адекватность индикации средств индикации, $\gamma(x'/\Xi(x'))$ – условная адекватность, фактора воздействия $x(t)$; $\gamma(x'/x)$ – условная адекватность индикации органов управления; x' – измеритель воздействия на имитируемые органы управления.

Когда в тренажере используются реальные средства индикации и органы управления, при условии $x'(t) = x(t)$:

$$\gamma(\Xi(x)/\Xi(x)) = 1, \quad \gamma(x'/\Xi(x')) = 1, \quad (4.61)$$

$$\gamma(x'/x) = 1, \Rightarrow \gamma(\Xi(x)) = \gamma(\Xi(x)).$$

Так как адекватность тренажера определяется в соответствии с (4.7), то условная немалого-функциональная адекватность γ_{ad} будет иметь вид:

$$\gamma_{ad}(x) = \gamma(\Xi(x')/\Xi(x)) \gamma(x'/\Xi(x)) \gamma(x'/x), \quad (4.62)$$

Если для одного объекта выполняются некоторые законы тренажеров (внутренний, специализированный и комплексный тренажер, тренажерные режимы работы объекта) с одной имитационной моделью объекта (имеет единственный источник адекватности $\gamma(\Xi(x))$), то для результирующей оценки адекватности тренажера необходимо иметь $\gamma(\Xi(x')/\Xi(x))$, $\gamma(x'/\Xi(x'))$ и $\gamma(x'/x)$. Оценка $\gamma(\Xi(x')/\Xi(x))$ и $\gamma(x'/x)$ можно определить на основании некоторых основ теории подобия [12].

Теперь рассмотрим методку оценки адекватности "белого" ящика.

Пусть имитационная модель объекта и тренажер синтезированы из уже существующих имитационных моделей его элементов (подсистем). Исходя из известного, что объект и его имитационная модель имеют адекватную структуру представлений. Если доступны статистические данные W_j и W_{ad} – по выходу; W_{j-1} и W_{ad-1} – по входу U и $U+1$ то неравнеческого уровня объекта и его модели. Так как начальный неравнеческого уровня в качестве входного блока могут быть приняты статистические данные, поступающие от органов управления соответственно от конечного уровня в качестве выходного блока выхода – статистические данные, поступающие на средства индикации.

Как и ранее, определены механизмы вероятностно-измерительной оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах.

Для объектов, имеющих неравнеческое описание функционирования и условий применения, их имитационная модель представляет собой функцию M_{ad} , выраженный через функционалы элементов близкого нижнего уровня $\{W_{ad1}, W_{ad2}, \dots, W_{adn}\}$, играющих роль агрегированных элементов

$$W_{ad} = f(W_{ad1}, W_{ad2}, \dots, W_{adn}), \quad (4.63)$$

Если эта функционалы M_{ad} в свою очередь, выражаются через функционалы моделей следующего нижележащего уровня и т.д.

Значение отклика объекта W и его имитационной модели W_{ad} можно представить в виде [14]:

$$W = M[W] + \theta, \quad (4.64)$$

$$W_{ad} = M[W_{ad}] + \theta_{ad}, \quad (4.65)$$

где $M\{W\}$ и $M\{W_m\}$ – математическое ожидание откликов соответственно системы и модели; ω и ω_m – случайные величины (математические ожидания $M\{\omega\}=0$, $M\{\omega_m\}=0$).

Пусть отклики имитационной модели W_m и объекта W представлены, соответственно, функционалами (4.63) и

$$W = f(W_1, W_2, \dots, W_j, \dots, W_k),$$

где $W_1, W_2, \dots, W_j, \dots, W_k$ – отклики элементов следующего уровня объекта.

В свою очередь, отклики элементов и их имитационных моделей можно представить аналогично (4.64) и (4.65). С учетом этого W и W_m будут соответственно иметь вид

$$\begin{aligned} W &= f(M\{W_1\} + \omega_1, M\{W_2\} + \omega_2, \dots, \\ &M\{W_j\} + \omega_j, \dots, M\{W_k\} + \omega_k), \\ W_m &= f_m(M\{W_{m1}\} + \omega_{m1}, M\{W_{m2}\} + \omega_{m2}, \dots, \\ &M\{W_{mj}\} + \omega_{mj}, \dots, M\{W_{mk}\} + \omega_{mk}). \end{aligned} \quad (4.66)$$

Разложив в ряд Тейлора (4.66) и (4.67) и приняв в качестве результирующей условной меры близости системы и модели [57] разность между W и W_m , имеем

$$\begin{aligned} e_p = W - W_m &= e + \sum_{j=1}^k \frac{\partial e}{\partial W_j} \omega_{mj} + \\ &+ \sum_{j=1}^k \frac{\partial^2 W_m}{\partial W_j^2} (\omega_j - \omega_{mj}) + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \frac{\partial^2 e}{\partial W_j \partial W_i} \times \\ &\times \omega_{mj} \omega_{mi} + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \frac{\partial^2 W_m}{\partial W_j \partial W_i} \times \\ &\times (\omega_j \omega_i - \omega_{mj} \omega_{mi}) + \dots \end{aligned} \quad (4.68)$$

где

$$e = W^* - W_m^*;$$

$$W^* = f(M\{W_1\}, M\{W_2\}, \dots, M\{W_k\});$$

$$W_m^* = f_m(M\{W_{m1}\}, M\{W_{m2}\}, \dots, M\{W_{mk}\}). \quad (4.69)$$

Очевидно, что значения математических ожиданий откликов элементов объекта могут отличаться от значений математических ожиданий откликов их имитационных моделей, соответственно, на $e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{mj}, \dots, e_{mk}$, следовательно

$$\begin{aligned} W^* &= f(M\{W_1\}, M\{W_2\}, \dots, M\{W_j\}, \dots, \\ M\{W_k\}) &= f(M\{W_{m1}\} + e_{m1}, M\{W_{m2}\} + e_{m2}, \dots, \\ M\{W_j\} + e_{mj}, \dots, M\{W_k\} + e_{mk}). \end{aligned} \quad (4.70)$$

На основании разложения (4.70) в ряд Тейлора равенство (4.69) будет иметь вид

$$\begin{aligned} e &= e_{\text{стр}} + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial W_m^*}{\partial W_j} + \frac{\partial e_{\text{стр}}}{\partial W_j} \right] e_{mj} + \\ &+ \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \left[\frac{\partial^2 W_m^*}{\partial W_j \partial W_i} + \frac{\partial^2 e_{\text{стр}}}{\partial W_j \partial W_i} \right] e_{mj} e_{mi} + \dots \end{aligned} \quad (4.71)$$

где $e_{\text{стр}} = f(M\{W_{m1}\}, M\{W_{m2}\}, \dots, M\{W_{mk}\}) - W_m^*$ – структурная мера близости.

Подставив (4.71) в (4.68) и сгруппировав его члены вокруг соответствующих частных производных, учитывая, что $e_{pj} = W_j - W_{mj}$, $e_j = W_j - M\{W_{mj}\}$, имеем

$$\begin{aligned} e_p &= e_{\text{стр}} + \sum_{j=1}^k \frac{\partial W_m^*}{\partial W_j} e_j + \sum_{j=1}^k \frac{\partial e_{\text{стр}}}{\partial W_j} \times \\ &\times (W_j - M\{W_{mj}\}) + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \frac{\partial^2 W_m^*}{\partial W_j \partial W_i} (e_{pj} e_{pi} + \\ &+ 2\omega_{mj} e_{pi}) + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \frac{\partial^2 e_{\text{стр}}}{\partial W_j \partial W_i} (W_j - M\{W_{mj}\}) \times \\ &\times (W_i - M\{W_{mi}\}) + \dots \end{aligned} \quad (4.72)$$

Если в соотношении (4.55) мультикативные нелинейности типа $e^* = e_{pj} e_{pi}$ представить в виде статистически линеаризованной зависимости [74]

$$e^* = e_{pj} M\{e_{pi}\} + M\{e_{pj}\} e_{pi} - \\ - M\{e_{pj}\} M\{e_{pi}\},$$

где $M\{e_{pj}\}$ и $M\{e_{pi}\}$ – математическое

ожидание случайных величин e_{pj} и e_{pi} , то математическое ожидание и дисперсия общей условной меры близости анализируемого уровня модели будет иметь вид

$$M\{e_p\} = M\{e_{стр}\} = \sum_{j=1}^k \frac{\partial W_{pj}^*}{\partial W_j} M\{e_{pi}\} + \sum_{j=1}^k M\left\{\frac{\partial e_{стр}}{\partial W_j}\right\} (M\{W_j\} - M\{W_{нi}\}) + \\ + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\partial^2 W_{pi}^*}{2\partial W_j \partial W_i} (M\{e_{pj}\} M\{e_{pi}\} + 2M\{\omega_{ij}\} M\{e_{pi}\}) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k M\left\{\frac{\partial^2 e_{стр}}{2\partial W_j \partial W_i}\right\} \times \\ \times (M\{W_j\} - M\{W_{нi}\})(M\{W_i\} - M\{W_{нi}\}) + \dots$$

$$S^2\{e_p\} = S^2\{e_{стр}\} + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial W_{pj}^*}{\partial W_j}\right]^2 S^2\{e_{pi}\} + \sum_{j=1}^k \left[M\left\{\frac{\partial e_{стр}}{\partial W_j}\right\}\right]^2 S^2\{W_j\} + \left[M\{W_j\}P - (M\{W_{нi}\})P\right] \times \\ \times S^2\left[\frac{\partial e_{стр}}{\partial W_j}\right] + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial^2 W_{pi}^*}{2\partial W_j \partial W_i}\right]^2 \left[M\{e_{pj}\}P S^2\{e_{pi}\} + S^2\{e_{pi}\} (M\{e_{pj}\})P + \right. \\ \left. + 2(M\{e_{pi}\})P S^2\{e_{pj}\} + S^2\{\omega_{ij}\} (M\{e_{pi}\})P\right] + \dots$$

Если известно, что по критерию Фишера [55] для имитационных моделей j -х элементов объекта выполняется предположение о несмещенности выборочного среднего $M\{e_{pj}\} = (M\{e_{pi}\} = 0$, следовательно $M\{W_j\} = M\{W_{нi}\}$, и о приемлемом разбросе результатов имитационного моделирования $S^2(e_{pj})$ по отношению к дисперсии ошибки эксперимента $\sigma^2(\omega_{pj})$, проверки имитационной модели объекта $(S^2(e_{pj}) \approx \sigma^2(\omega_{pj}))$, то (4.73) и (4.74) примут вид

$$M\{e_p\} = M\{e_{стр}\}, \quad (4.75)$$

$$S^2\{e_p\} = S^2\{e_{стр}\} + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial W_{pj}^*}{\partial W_j}\right]^2 \times \\ \times S^2\{e_{pi}\} + \sum_{j=1}^k \left[M\left\{\frac{\partial e_{стр}}{\partial W_j}\right\}\right]^2 S^2\{W_j\} + \dots \quad (4.76)$$

Для оценки адекватности имитационного моделирования по критерию Фишера используются F -отношением [55], которое с учетом (4.76) примет вид

$$F_{f,n} = \frac{S^2\{e_{стр}\} + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial W_{pj}^*}{\partial W_j}\right]^2 S^2\{e_{pi}\} + \sum_{j=1}^k \left[M\left\{\frac{\partial e_{стр}}{\partial W_j}\right\}\right]^2 S^2\{W_j\} + \dots}{\sigma^2\{e_{стр}\} + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial W_{pj}^*}{\partial W_j}\right]^2 \sigma^2\{e_{pi}\} + \sum_{j=1}^k \left[M\left\{\frac{\partial e_{стр}}{\partial W_j}\right\}\right]^2 \sigma^2\{\omega_j\} + \dots}, \quad (4.77)$$

где $\sigma^2\{\omega_{стр}\}$, $\sigma^2\{\omega_{pf}\}$ и $\sigma^2\{\omega_j\}$ – дисперсии ошибок эксперимента.

При выполнении условия $F_{f,p} \leq F_{f,p,\alpha}$,

где $F_{f,p,\alpha}$ – критическое значение критерия Фишера для заданного уровня значимости α , величина $S^2\{e_p\}$ может быть объяснена случайным разбросом экспериментальных данных и, следовательно, нет оснований для отказа от проверяемой имитационной модели $M\{e_p\}=0$ и согласно соотношению (4.58) $M\{e_{exp}\}=0$, значит

$$\begin{aligned} f(M\{W_1\}, M\{W_2\}, \dots, M\{W_k\}) = \\ = f_m(M\{W_{m1}\}, M\{W_{m2}\}, \dots, M\{W_{mk}\}), \end{aligned} \quad (4.78)$$

т.е. подтверждается, что моделируемый функционал объекта соответствует реальному.

Таким образом, полученные результаты оценки адекватности по критерию Фишера имитационного моделирования исследуемого уровня иерархии объекта могут быть исходными как для оценки адекватности имитационного моделирования следующего ближайшего верхнего уровня, так и для уточнения его адекватности (по статистическому критерию Фишера – Хи-квадрат [55]).

Все это позволяет произвести оценку адекватности имитационной модели объекта при ограниченном количестве экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний штатной техники, а в случае неадекватности имитационного моделирования выявить и устранить ее причины.

При выполнении равенства (4.60) отклик объекта можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} W = W^* + \sum_{j=1}^k \frac{\partial W^*}{\partial W_j} (W_j - M\{W_j\}) + \\ + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \frac{\partial^2 W^*}{2 \partial W_j \partial W_i} (W_j - M\{W_j\}) \times \\ \times (W_i - M\{W_i\}) + \dots \end{aligned} \quad (4.79)$$

Если принять в качестве W информационное поле $\Xi(x)$ объекта, а в качестве W_j – воздействия x на органы управления, то соотношение (4.78) и модуль от соотношения (4.68) позволяет по критерию Хи-квадрат определить адекватности имитационного моделирования объекта в вероятностно-метрической форме (4.59).

В заключение необходимо отметить, что каждый из представленных методов оценки адекватности имитационного моделирования имеет как достоинства, так и недостатки.

Достоинством первого метода (оценка адекватности "черного ящика") является то, что исследователю нет необходимости в знании структуры построения имитационной модели. Недостатком этого метода является то, что при выявлении недостаточной адекватности имитационного моделирования объектов исследователь не может выявить причины неадекватности с целью их дальнейшего устранения. Помимо этого при изменении как условий применения (воздействий на органы управления $x(t)$), так и имитационной модели (из-за модернизации отдельных подсистем объектов), данный метод требует новых статистических данных информационного поля $\Xi(x)$ объектов.

Второй метод (оценка адекватности "белого ящика") позволяет устранить отмеченные недостатки первого метода. Это является его достоинством. Однако он имеет свой недостаток, выраженный в формировании методических ошибок. Методическая ошибка образуется в процессе разложения функционалов объекта и модели в ряды Тейлора и ограничения в использовании их членов. Очевидно, что данную ошибку можно выявить на основании сопоставления оценок адекватности, полученных вторым и первым методами.

В дальнейшем выявленную таким образом методическую ошибку можно учесть при использовании подтвержденных функционалов для получения новых статистических данных $\Xi(x)$. При этом в

случае изменения условий применения объектов нет необходимости в получении дополнительных статистических данных. При модернизации отдельных подсистем объектов требуются дополнительные статистические данные лишь от этих подсистем. Однако для гарантирования правильности проводимых исследований желательно (по мере возможности) их подтверждать первым методом.

Необходимо отметить, что некоторые функционалы подсистем не имеют частных производных (например, функционалы со скачкообразной структурой). Если эту проблему устранить невозможно за счет "объединения" таких подсистем в подсистемы более высокого уровня, у которых функционалы имеют частные производные, то применим только первый метод оценки адекватности имитационного моделирования.

4.3.2. Оценка адекватности имитационного моделирования с привлечением экспертов

Адекватность имитационного моделирования в тренажерах объектов может быть определена, если имеются или могут быть получены необходимые и достоверные экспериментальные данные функционирования и условий применения штатной техники.

Однако статистические экспериментальные данные, представляющие собой выборку $\{W_i(x)\}_n$ из n элементов некоторого параметра (отклика) $W(x)$ объекта, необходимые для оценки вероятности γ адекватности имитационного моделирования в тренажере, как правило, отсутствуют [35]. Единственно возможный путь получения необходимых экспериментальных данных $\{W_i(x)\}_n$ — это проведение натуральных испытаний объекта.

Известно, что заданной точности β и уровню значимости α оценки адекватности имитации параметра $W(x)$ соответст-

вует необходимое (минимальное) число испытаний $n_{\min}$ объекта [52].

Поэтому для оценки адекватности имитационного моделирования в тренажерах необходима выборка значений $\{W_i(x)\}_n$ параметра $W(x)$, состоящая из $n = n_{\min}$ элементов. А это означает, что необходимо проведение $n_{\min}$ количества натуральных испытаний объектов.

Однако порой из-за сложности проведения испытаний объектов в организационно-техническом плане и по экономическим соображениям число испытаний ограничивается до k , т.е. возможная выборка значений $\{W_i(x)\}_k$ параметра $W(x)$ состоит из k значений, причем $k < n_{\min}$.

Это приводит к увеличению ошибки β оценки адекватности имитации параметра $W(x)$. А с учетом значимости этого параметра увеличение ошибки β может привести к возрастанию вторичных конфликтов планирования тренажной подготовки операторов с использованием тренажера [56].

Для получения недостающего $n - k$ количества экспериментальных данных $\{W_i(x)\}_{n-k}$ параметра $W(x)$ до $\{W_i(x)\}_n$, необходимых для оценки адекватности γ имитационного моделирования в тренажере объекта, предлагается использовать экспертную оценку $W_2(x)$ параметра $W(x)$ [126].

Суть экспертной оценки $W_2(x)$ параметра $W(x)$ заключается в том, что для получения недостающей статистической информации $\{W_i(x)\}_{n-k}$ о его значениях привлекаются лица (эксперты), обладающие специальными знаниями и опытом работы с данным объектом (или его аналогом).

Каждый i -й эксперт дает свою оценку $W_{2i}(x)$ параметра $W(x)$. Для получения выборки $\{W_i(x)\}_{n-k}$ из $n - k$ элементов необходимо N экспертов, количество которых определяется количеством $n_{\min}$ элементов выборки $\{W_i(x)\}_n$ и k проведенных ис-

пытаний объекта, т.е. $N = n_{\text{мин}} - k$.

Однако необходимо учитывать, что и число экспертов, как и экспериментальных данных, также ограничено. Реальное количество экспертов может быть определено по несколько усовершенствованной методике, суть которой состоит в следующем: некоторой начальной группе, состоящей из M_0 известных исследователю экспертов ($M_0 < N$), предлагается независимо друг от друга назвать g им известных кандидатов, которые могут принять участие в данной экспертизе. Если на основании этого опроса получится, что реальное количество кандидатов, определяемое как

$$N_p = \sum_{m=1}^{M_0} \mu(m) + M_0, \quad (4.80)$$

будет примерно равно

$$N^* = \frac{(gM_0 + 1)(M_0 - 1)}{(gM_0 + 1) - \sum_{m=1}^{M_0} \mu(m)} + 1, \quad (4.81)$$

где

$$\mu(m) = \begin{cases} g, & \text{если } m\text{-й кандидат из } M_0 \\ & \text{назвал } g \text{ кандидатов, не} \\ & \text{входящих } M_0; \\ g-1, & \text{если } m\text{-й кандидат из } M_0 \\ & \text{назвал } g-1 \text{ кандидатов, не} \\ & \text{входящих } M_0; \\ \dots\dots\dots \\ 0, & \text{если } m\text{-й кандидат из } M_0 \\ & \text{назвал } 0 \text{ кандидатов, не} \\ & \text{входящих } M_0, \end{cases}$$

то достаточно одного тура опроса. В противном случае будет проводиться следующий тур с привлечением выявленных в предыдущем туре компетентных экспертов.

Для повышения достоверности экспертной оценки i -го эксперта $W_i(x)$ параметра системы $W(x)$ используют числовую оценку, характеризующую эксперта — степень его компетенции (вес ω_i i -го эксперта) в определении параметра $W(x)$ [23, 94]. А с учетом веса ω_i i -го эксперта по

его оценке $W_i(x)$ можно определить соответствующее ей i -е значение выборки $\{W_i(x)\}_{i=1}^N$. Для этого определяется выборочное среднее

$$M(W_i(x)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i(x)$$

и средневзвешенное значение

$$W(x) = m(W_i(x)) = \left(\sum_{i=1}^N \omega_i W_i(x) \right) / \sum_{i=1}^N \omega_i$$

Величина

$$\Delta W_i(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i(x) - \left(\sum_{i=1}^N \omega_i W_i(x) \right) / \sum_{i=1}^N \omega_i \quad (4.82)$$

показывает, на сколько отличается выборочное среднее значение экспертной оценки (без учета компетентности экспертов) от средневзвешенного (с учетом компетентности экспертов).

На основании соотношения (4.82) имеем, что

$$W_i(x) = W_{\text{н}}(x) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i(x) + \left(\sum_{i=1}^N \omega_i W_i(x) \right) / \sum_{i=1}^N \omega_i \quad (4.83)$$

Очевидно, что если $\omega_i = 1$ (для всех $i = 1, 2, \dots, N$), то $\Delta W_i(x) = 0$, следовательно $W_i(x) = W_{\text{н}}(x)$.

Вес ω_i i -го эксперта можно определить на основании его тестирования по экспериментально подтвержденным заданиям. Так, если имеются k фактических статистических данных параметра $W(x)$, полученных в ходе s -го испытания системы, то [23]

$$\omega_i = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^k \exp \left[- (W_{\text{н}}(x) - W_s(x))^2 / 2S_s^2(W_s(x)) \right],$$

где $W_i(x)$ – фактическое значение параметра $W(x)$; $S_i^2(W_i(x))$ – выборочная дисперсия, определяемая как

$$S_i^2(W_i(x)) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (W_{in}(x) - W_i(x))^2.$$

На основании полученных значений весовых коэффициентов компетентности ω_i каждого i -го эксперта можно определить степень согласованности мнений экспертов в независимой экспертизе, т.е. когда все эксперты изолированы

$$\sigma^2(W_i(x)) = \left(\sum_{i=1}^N (W_{in}(x) - m(W_i(x)))^2 \omega_i \right) / \sum_{i=1}^N \omega_i.$$

Чем меньше величина $\sigma^2(W_i(x))$, тем с большей уверенностью можно доверять найденному значению $m(W_i(x))$ и, следовательно, $W_i(x)$ в соответствии с соотношением (4.83).

Очевидно, что реальное число экспертов $N = N_p$ может оказаться как больше, так и меньше $N_{\text{пот}}$. Поэтому при $N > N_{\text{пот}}$ рекомендуется по результатам тестирования из N произвести выбор $N_{\text{пот}}$ – наиболее компетентных экспертов. Если $N < N_{\text{пот}}$, то вероятностно-метрическая оценка адекватности имитационного моделирования в тренажере может производиться лишь по $N + k$ статистическим данным, следовательно, ее точность не будет соответствовать заданной. Однако экспертиза значений параметров позволяет определить дополнительное количество экспериментальных данных, что повышает точность оценки адекватности имитационного моделирования.

4.3.3. Оценка адекватности имитационного моделирования в тренажерах "глазами обучаемых"

Известно, что оценку адекватности тренажеров можно произвести на основании сопоставления их имитационного

моделирования с функционированием штатной техники.

Если в ходе тренажной подготовки операторов используется совместно с тренажерами штатная техника, а обучаемые прошли полный курс подготовки, то они могут сравнить используемые в процессе их обучения тренажеры и штатную технику между собой. Поэтому оценку адекватности тренажеров в вероятностно-метрической форме можно произвести силами учебного заведения или центров подготовки операторов с привлечением самих обучаемых. Это позволит избежать дополнительных расходов, связанных с проведением испытаний тренажеров и штатной техники. При малых группах обучаемых необходимую статистику для требуемой точности оценки адекватности можно получить методом ее накопления [56].

Оценку адекватности тренажеров можно провести на основании анкетирования обучаемых. Для этого должны быть сформированы анкеты, включающие вопросы в соответствии с информационными признаками, по которым должно происходить сравнение тренажеров со штатной техникой.

Необходимо напомнить, что в работе [52] принята следующая форма оценки адекватности тренажеров (4.59).

С учетом этого постановка вопроса в "анкете обучаемых" по конкретному информационному признаку тренажера должна иметь следующий смысл: "На сколько вы оцениваете, что при воздействиях на органы управления расхождение между информационным признаком тренажера и штатной техники не превышает 10 ... 15 %?". При ответе на поставленный вопрос обучаемый выставляет свою балльную оценку $\omega \in [0, \omega_{\text{макс}}]$, где $\omega_{\text{макс}}$ – максимально допустимая оценка.

Необходимо обобщенное уточнение: в соответствии с балльной оценкой адекватности тренажера соотношение (4.1) будет иметь несколько иной вид:

$$\gamma = \frac{\omega_j}{\omega_{\max}} \quad (4.84)$$

Будем считать, что отсутствуют какие-либо эталонные данные, характеризующие функционирование штатной техники, которые могут быть использованы для определения компетентности обучаемых, а значит в анкете отсутствуют вопросы, связанные с определением последней.

В дальнейшем не будем заострять внимание как на самих принципах формирования анкеты, так и на информационных признаках, по которым должно происходить сравнение тренажеров со штатной техникой.

Предположим, что анкета уже сформирована и она состоит из M вопросов. Причем каждый j -й вопрос характеризует конкретный j -й информационный признак тренажера. В анкете отсутствуют дополнительные вопросы, направленные на выявление искренности ответов анкетирруемых, их готовности давать объективную оценку, а значит и компетентности в оценках адекватности тренажера. Необходимо определить методику обработки результатов анкет с учетом введенных ограничений.

Очевидно, что каждый вопрос в анкете имеет свою значимость. Экспертным путем можно предварительно проранжировать эти вопросы и определить вес каждого j -го вопроса [94]. С учетом этого результирующая оценка адекватности тренажера, данная i -м обучаемым, будет определяться как

$$\omega_i^* = \sum_{j=1}^M \delta_{jy} \omega_{ij} \quad (4.85)$$

где δ_{jy} – эталонный вес j -го информационного признака тренажера, который должен удовлетворять условию нормировки $\sum_{j=1}^M \delta_{jy} = 1$; ω_{ij} – оценка i -м обу-

чаемым j -го информационного признака тренажера ($\omega_{ij} \in [0, \omega_{\max}]$).

В свою очередь, общая оценка адекватности тренажера при обработке N анкет может определяться по следующему соотношению [23]:

$$\omega^* = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \omega_i^*}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (4.86)$$

где α_i – компетентность i -го обучаемого.

Так как по условию в анкете отсутствуют дополнительные вопросы, по которым можно было бы определить компетентность, то в прямой постановке, используя традиционные методы, определить ее не представляется возможным [94]. Остановимся подробнее на определении компетентности анкетирруемых на примере использования одного традиционного метода. Пусть одни и те же анкетирруемые многократно используются для оценивания числовых величин. Относительная ошибка i -го анкетирруемого при k -м опросе равна

$$\varepsilon_{ik} = \frac{|T_{ik} - T_{ik}|}{T_{ik}} \quad (4.87)$$

где T_{ik} – эталонное значение; T_{ik} – оценка, данная i -м анкетирруемым.

Тогда [94]

$$\alpha_i = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{m_k} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{jk} \right)}{\frac{1}{m_i} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{ik}} \quad (4.88)$$

где m_n ($n = i, k$) – количество оценок, которые дал n -й анкетирруемый.

Примем, что оценка компетентности анкетирруемых возможна только в рамках текущего опроса ($H = 1$). Следовательно, количество оценок, которое может дать анкетирруемый, ограничивается количест-

вом вопросов в анкете ($m_n = M$). С учетом этого соотношения (4.87) и (4.88) будут иметь вид

$$\varepsilon_{ij} = \frac{|\delta_{ij} - \delta_{ij}^*|}{\delta_{ij}}, \quad (4.89)$$

$$\alpha_i = 1 - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \varepsilon_{ij}, \quad (4.90)$$

где δ_{ij}^* – эталонное значение веса j -го вопроса анкеты; δ_{ij} – оценка веса j -го вопроса анкеты, данная i -м анкетиремым.

Так как оценки δ_{ij} в явном виде отсутствуют, то возможность использования (4.90) и (4.89) для определения компетентности в прямой постановке не представляется возможной.

Оценку компетентности ответа i -го обучаемого на j -й вопрос анкеты можно произвести и без наличия эталонных данных по следующему соотношению [23]:

$$\alpha_{ij} = \exp \left\{ - \frac{(\omega_{ij} - \bar{\omega}_j)^2}{2S_j} \right\}, \quad (4.91)$$

где

$$\bar{\omega}_j = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_{ij} \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^N \alpha_{ij}}, \quad (4.92)$$

$$S_j = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\omega_{ij} - \bar{\omega}_j)^2 \quad (4.93)$$

соответственно средневзвешенная оценка и дисперсия ошибки j -го информационного признака тренажера.

Процедура определения α_{ij} основана на методе итерации и состоит в следующем:

- 1) первоначально задают $\alpha_{ij} = 1$;
- 2) по соотношениям (4.92) и (4.93) на основании личных оценок ω_{ij} определяются компоненты соотношения (4.91);
- 3) по соотношению (4.91) производят уточненное вычисление α_{ij} ;
- 4) в соответствии с новым значением α_{ij} происходит повторное выполнение 2) и 3) до тех пор, пока не будет достигнуто стационарное состояние значений α_{ij} , $\bar{\omega}_j$ и S_j .

Очевидно, что возможна такая ситуация, когда по каждому оцениваемому j -му информационному признаку тренажера анкетиремый будет иметь различные степени компетентности. Что не совсем корректно.

В целях устранения этого недостатка предлагается определять средневзвешенную оценку $\bar{\alpha}_i$ компетентности с учетом ранее полученных α_{ij} . Процедура нахождения средневзвешенной оценки $\bar{\alpha}_i$ происходит аналогичным образом, как и $\bar{\omega}_j$, по следующему соотношению [47]:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\sum_{j=1}^M \beta_{ij} \alpha_{ij}}{\sum_{j=1}^M \beta_{ij}}, \quad (4.94)$$

где

$$\beta_{ij} = \exp \left\{ - \frac{(\alpha_{ij} - \bar{\alpha}_i)^2}{2D_i} \right\},$$

$$D_i = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (\alpha_{ij} - \bar{\alpha}_i)^2$$

соответственно степень значимости j -го информационного признака тренажера и дисперсия ошибки компетентности i -го анкетиремого.

Имея значения β_{ij} , можно определить вес каждого j -го вопроса, соответствующий i -му анкетизируемому:

$$\delta_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{\sum_{j=1}^M \beta_{ij}}$$

На основании сравнения δ_{ij} с δ_{ij} , в соответствии с соотношением (4.89) можно определить относительную ошибку оценки веса j -го вопроса i -го анкетизируемого, а значит, используя соотношение (4.90), и его компетентность α_i .

Необходимо отметить, что для обеспечения организованного управления тренажной подготовкой важно знать не только результирующую оценку адекватности тренажера, определяемую по соотношениям (4.85) и (4.86), но и оценки j -х его информационного признаков. Это позволит выявлять причинно-следственные факторы, характеризующие адекватность тренажера и определять управляющие воздействия, направленные на корректировку конкретных аспектов его использования в интересах повышения качества обучения.

С учетом этого, не нарушая общности рассуждений, соотношения (4.85) и (4.86) можно представить несколько иначе:

$$\omega_j^* = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^N \alpha_i}, \quad (4.95)$$

$$\omega^* = \sum_{j=1}^M \delta_j^* \omega_j, \quad (4.96)$$

где $\alpha_i^* = \alpha_i \bar{\alpha}_i$ – уточненная оценка компетентности i -го анкетизируемого;

$$\delta_j^* = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i^* \delta_{ij}}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \beta_{ij}} - \text{вес } j\text{-го вопроса анкеты,}$$

определенный по результатам анкетирования.

Окончательную степень согласованности результатов анкетирования можно оценить по следующим соотношениям:

$$\sigma^2(\omega_j) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i^* (\omega_{ij} - \omega_j^*)^2}{\sum_{i=1}^N \alpha_i^*},$$

$$\sigma^2(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^M \beta_{ij} (\omega_j^* - \omega^*)^2}{\sum_{j=1}^M \beta_{ij}},$$

где $\beta_j = \sum_{i=1}^N \beta_{ij}$ – суммарная по результатам анкетирования оценка степени значимости j -го вопроса анкеты.

Чем меньше значения $\sigma^2(\omega_j)$ и $\sigma^2(\omega)$, тем с большей уверенностью можно доверять найденным значениям ω_j^* и ω^* .

На основании (4.95) и (4.96) с учетом (4.84) получаем соответствующие оценки адекватности тренажера, которые будут иметь вид

$$\gamma_j^* = \frac{\omega_j^*}{\omega_{\max}}, \quad (4.97)$$

$$\gamma^* = \frac{\omega^*}{\omega_{\max}}. \quad (4.98)$$

Определение δ_j возможно на основании проведения предварительной экспертизы вопросов "анкеты обучаемого". По аналогии с выше изложенным суть такой экспертизы может заключаться в привлечении N_j экспертов, которые по каждому j -му вопросу "анкеты обучаемого" выставляя оценку β_{jmt} его значимости, $m = \overline{1, N_j}$. Причем эта оценка может быть бальной. Зная компетентность α_m

m -го эксперта, можно определить средневзвешенную экспертную оценку j -го вопроса и дисперсию ее ошибки

$$\bar{\beta}_y = \frac{\sum_{m=1}^{N_y} \alpha_m \beta_{ym}}{\sum_{m=1}^{N_y} \beta_{ym}},$$

$$\sigma^2(\beta_y) = \frac{\sum_{m=1}^{N_y} \alpha_m (\beta_{ym} - \bar{\beta}_y)^2}{\sum_{m=1}^{N_y} \beta_{ym}}.$$

Следовательно эталонное значение веса j -го вопроса, используемого в дальнейшем для обработки результатов анкетирования, может быть определено как

$$\delta_y = \frac{\beta_y}{\sum_{j=1}^M \bar{\beta}_y}$$

Очевидно, что чем выше α_m и больше N_y , тем меньше дисперсия $\sigma^2(\beta_y)$, с тем большей уверенностью можно доверять найденным значениям $\bar{\beta}_y$, а значит и δ_y .

С учетом этого, для проведения экспертизы необходимо первоначально сформировать группу, состоящую из N_y компетентных экспертов. Для этого можно воспользоваться несколько модернизированной методикой [126].

Пусть организатору экспертизы "анкеты обучаемых" известно G кандидатов, которые могут принять в ней участие. Сначала по контрольному тесту определяют компетентность α_m кандидатов. Это возможно, если в основу теста заложить некоторые эталонные значения, которые сравниваются со значениями ответов кандидатов в соответствии с соотношениями (4.87), (4.88).

Далее, задав граничное значение компетентности $\alpha_{\text{зд}}$, производится выбраковка некомпетентных кандидатов, у

которых $\alpha_m < \alpha_{\text{зд}}$. Таким образом, формируется группа из $M_0 < G$ компетентных экспертов ($\alpha_m \geq \alpha_{\text{зд}}$).

Затем производится независимый друг от друга опрос M_0 экспертов, суть которого заключается в следующем: каждый m -й эксперт из M_0 называет p ему известных кандидатов, которые могут принять участие в данной экспертизе и не входят в M_0 .

Далее для каждого из p известных кандидатов по аналогии с формированием M_0 происходит выбраковка некомпетентных. С учетом этого определяется g компетентных кандидатов, неизвестных руководителю экспертизы.

Если на основании этого опроса получится, что реальное количество компетентных кандидатов, определяемое по (4.63), будет примерно равно (4.64), то достаточно одного тура опроса. В противном случае будет проводиться следующий тур с привлечением выявленных в предыдущем туре компетентных экспертов.

Далее производится экспертиза по оценке весовых показателей вопросов анкеты.

Каждому эксперту (кандидату экспертизы) предлагают анкету. Отличительной особенностью "анкеты эксперта" от "анкеты обучаемого" может быть то, что помимо вопросов, включенных в последнюю и по которым должны произвести экспертизу, могут быть включены дополнительные вопросы, необходимые для определения компетентности α_m эксперта и p известных ему кандидатов на участие в экспертизе. Помимо этого проведение такой экспертизы позволит формировать корректную "анкету обучаемых" с учетом весовых оценок δ_y , например, исключая те вопросы, которые имеют в анкете наименьшую значимость.

На основании вышеизложенного, процесс организации анкетирования и обработки его результатов можно пред-

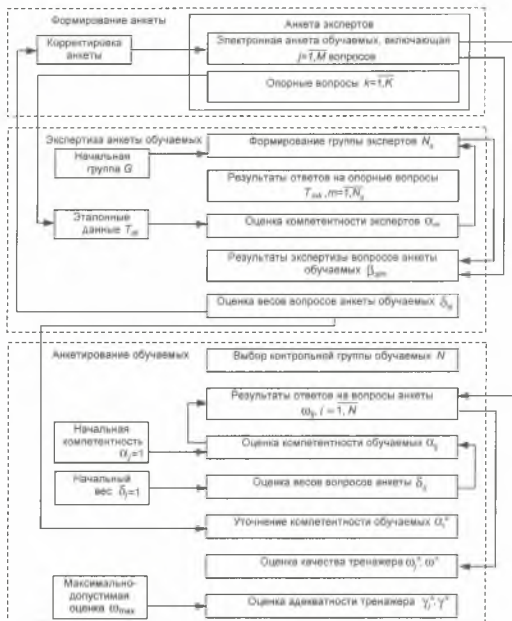


Рис. 4.14. Процесс организации оценки адекватности тренажеров "глазами обучающихся"

ставить в виде обобщенной структуры, изображенной на рис. 4.14.

Для обеспечения независимого анкетирования обучаемых необходимо проводить предварительную экспертизу анкет для определения эталонных значений, а далее само анкетирование и обработку его результатов в соответствии с предложенными процедурами.

Рассмотренный способ оценки адекватности тренажеров "глазами обучаемых", базирующийся на применении "анкет обучаемых" и "анкет экспертов", вполне возможно реализовать в рамках учебного заведения или центра подготовки операторов, где в учебном процессе используются тренажеры.

Совместное использование предложенных методик обработки результатов экспертизы и анкетирования позволит оценивать адекватность тренажеров, следовательно, корректно производить оценку качества организации и планирование

занятий с использованием тренажеров и штатной техники, что является своего рода информационным обеспечением организационного управления тренажной подготовкой. В свою очередь, такое информационное обеспечение способствует принятию компетентных решений в системе организационного управления тренажной подготовкой.

Очевидно, что оценка адекватности тренажера (4.98) может быть использована для корректного планирования всей тренажной подготовки [60, 61]. В свою очередь оценка адекватности j -го информационного признака (4.97) с учетом его значимости может быть использована как для совершенствования методического обеспечения и деятельности инструкторского состава, направленных на сглаживание выявленных недостатков тренажеров, так и для предъявления требований к разработчикам тренажеров по их модернизации.

Раздел II

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Глава 5

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

5.1. РОЛЬ И МЕСТО МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕШЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Методическое обеспечение является одной из основных составляющих процесса подготовки операторов и представляет собой совокупность учебных положений (принципов, требований, форм), методов обучения и учебно-методических материалов (учебников, учебных пособий, программной и учебной документации, результатов НИР, макетов, компьютерных обучающих средств и т.п.), разрабатываемых и используемых в процессе подготовки операторов на тренажерных комплексах и тренажерах.

На методическое обеспечение процесса подготовки персонала на тренажерах и тренажных комплексах неизбежно накладывает свой отпечаток многофункциональность задач подготовки операторов. Это, в свою очередь, определяется многомерной структурой операторской деятельности, большим разнообразием и сложностью решаемых оператором задач, способностью адаптироваться в различных режимах работы сложных человеко-машинных комплексов и изменять характеристики поведения в различных условиях.

В процессе разработки методического обеспечения определяются следующие аспекты подготовки операторов:

- общая методология и технология подготовки операторов (методы обучения, взаимосвязь и последовательность изложения дисциплин, формы подачи учебного материала и др.);
- состав и формы представления учебно-методической документации для подготовки;
- состав и последовательность использования учебно-методических и тренажных средств подготовки;
- требуемый (достаточный) объем подготовки (совокупность знаний, навыков, умений) операторов в соответствии с их распределением по должностям и с учетом установленных для них уровней квалификации;
- формы и методы организации и проведения контроля подготовки операторов и др.

В результате разработки методического обеспечения формируются требования ко всем процессам, документированным процедурам, этапам и видам (дисциплинам и разделам) профессиональной подготовки специалистов.

Опыт практической подготовки экипажей, осуществляющих управление сложными объектами, позволяет классифицировать основные методические принципы подготовки операторов следующим образом:

- общие методические принципы подготовки;

- методические принципы составления программы операторов;

- методические принципы и способы повышения сложности тренировки при разработке циклограммы и сценария;

- методические принципы выбора операций, отрабатываемых на тренировках.

Общие методические принципы подготовки состоят в следующем:

- обучение производится на основе последовательного перехода от простого к сложному;

- на тренажерах необходимо максимально точно воспроизводить реальные условия выполнения операций;

- при отработке выполнения операций последовательность действий оператора должна быть осмысленной;

- способы решения разнообразных процедур согласно эксплуатационной документации должны быть унифицированы;

- необходимо, используя принцип обратной связи, постоянно оценивать деятельность операторов на тренировках и занятиях и производить разбор ошибочных действий.

Методические принципы составления программы подготовки операторов состоят в следующем:

- следует выделять однотипные операции и процедуры;

- нормативное число повторений однотипных операций устанавливают исходя из их общего объема и важности этих операций;

- следует планировать постепенное возрастание сложности тренировочных упражнений;

- для поддержания навыков выполнения операций определяют рациональную частоту их отработки;

- логическую последовательность выполнения операций планируют с учетом штатной циклограммы рабочего дня экипажа;

- по возможности при планировании исключают однообразные операции и режимы, предусматривая рациональное со-

четание работы с различными подсистемами и оборудованием;

- занятие должно быть по возможности более насыщенным, т.е. необходимо предусматривать активное задействование оператора в течение всей тренировки;

- сложные режимы и нештатные ситуации равномерно распределяют по циклограмме тренировки;

- ввод нештатных и аварийных ситуаций должен осуществляться логично и корректно.

Методические принципы и способы повышения сложности тренировок при разработке циклограммы и сценария состоят в следующем:

- включаются операции, наиболее сложные с точки зрения алгоритма действий или источников представления информации;

- при выполнении одних и тех же операций условия деятельности необходимо изменять;

- вводится ряд нештатных ситуаций по одной системе либо взаимосвязанных нештатных ситуаций по разным системам;

- применяются "отвлекающие" нештатные ситуации, не критичные по времени принятия решения по выходу из них на фоне развития аварийной ситуации;

- выбирается время ввода нештатных ситуаций таким образом, когда оператор вынужден принимать решения самостоятельно;

- практикуется передача заведомо ошибочной информации.

Методические принципы выбора операций, отрабатываемых на тренировках, состоят в том, что в план тренировки включаются следующие операции:

- критичные к ошибкам экипажа;
- критичные ко времени выполнения (задачи быстрого реагирования);

- требующие навыков и многократного повторения тренировок;

- сложные для выполнения экипажем.

- требующие хорошего взаимодействия персонала.

Для обеспечения подготовки операторов сложных объектов, как правило, в состав структуры управления процессом их подготовки включается группа методического обеспечения. На эту группу возлагаются следующие задачи:

- разработка требований к уровню подготовленности операторов по управлению операциями (процедурами), системами и оборудованием объекта с учетом их специализации и функциональных обязанностей;
- проведение анализа функций членов экипажа на различных этапах создания сложного объекта;
- разработка требований к программам по видам и направлениям подготовки операторов;
- разработка стандартов оценивания подготовленности операторов на тренировках;
- разработка методических рекомендаций по подготовке операторов и требований к тренажерам и тренажным комплексам, учебным пособиям и бортовой документации;
- обобщение информации о ходе подготовки операторов по отдельным этапам и дисциплинам, достигнутом уровне их подготовленности и выдача рекомендаций по распределению ресурсов подготовки.

Результатом работы группы методического обеспечения должно быть:

- совершенствование существующих форм и методов подготовки операторов и изыскание новых, наиболее эффективных методов подготовки;
- совершенствование теоретических знаний и методического мастерства руководителей занятий по обучению операторов;
- внедрение в процесс подготовки наиболее совершенных технических средств;
- установление единства в понимании и применении руководителями занятий методов подготовки;

– изучение, обобщение и внедрение опыта лучших руководителей занятий;

– исследование и обобщение учебной и воспитательной работы и внедрение передовых форм и методов в практику подготовки;

– улучшение организации процесса подготовки в целом и совершенствование форм и содержания документов по подготовке.

Качество разрабатываемого и используемого методического обеспечения подготовки операторов в существенной степени зависит от уровня методической подготовки инструкторско-преподавательского состава. Поэтому следует практиковать обмен мнениями по основным видам методической работы, в том числе:

- изучение и обсуждение методической документации, докладов по общей структуре дисциплин, методик изложения принципиальных вопросов программы;
- разработка учебных и методических пособий вспомогательных учебных материалов и их обсуждение;
- обсуждение методики проведения отдельных видов занятий, консультаций, зачетов, экзаменов;
- проведение инструктивно-методических занятий по вопросам программ подготовки операторов;
- проведение "открытых" (показательных) занятий опытными инструкторами и инженерами-испытателями;
- обсуждение открытых и пробных занятий специалистами – участниками подготовки;
- анализ и обсуждение итогов отдельных тренировок;
- обсуждение обобщенных результатов контрольных посещений занятий;
- постановка и обсуждение вопросов методики проведения тренировок;
- рассмотрение вопросов организации обеспечения и контроля самостоятельной работы обучаемых;
- проведение методических сборов по обмену опытом и выработке наиболее

эффективных методов и форм подготовки с учетом специфики решаемых задач и др.

Одним из направлений методической работы является совершенствование учебно-тренировочной базы (стендов, спецклассов, аудиторий, кабинетов) и внедрение в учебный процесс современных технических средств и наглядных пособий.

Если в подготовке операторов участвуют несколько стран, то следует учитывать особенности методического обеспечения стран-партнеров и необходимость сочетания в одном тренировочном процессе различных систем подготовки операторов. Например, при подготовке российско-американских экипажей МКС в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина в процессе организации многосегментных тренировок для того, чтобы обеспечить взаимодействие и учет методических особенностей подготовки в разных странах, были созданы совместные тренировочные бригады и разработаны согласованные требования к уровню подготовленности членов международного экипажа. Кроме этого, была осуществлена разработка учебно-методической (двуязычной) документации и форм отчетности по результатам проведения многосегментных тренировок. По результатам тренировок производилась сертификация международных экипажей.

5.2. ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Планирование подготовки операторов направлено на решение задач оптимального распределения учебной нагрузки, своевременного и полного выполнения программы подготовки, наиболее эффективного использования тренажерного комплекса. Оно предполагает не только разработку программы, плана-графика и плана подготовки оператора (группы операторов), но и организацию выполнения этого плана, а также контроль полноты выполнения сформированной программы, плана-графика и плана подготовки.

Существуют следующие виды планирования:

- долгосрочное (программа и план всего этапа подготовки операторов);
- на определенный период времени – тренировочную сессию (программа и план-график тренировочной сессии);
- текущее (текущий план-график почасового планирования и план подготовки).

Программа подготовки операторов на всех ее этапах формируется из отдельных программ по видам и разделам подготовки; их состав и объем определяется целями и задачами подготовки соответствующей группы на данном этапе. Различают типовые программы этапов подготовки и программы подготовки конкретных наборов групп операторов, планы подготовки на неделю, на текущий день и др. План подготовки является основным документом, регламентирующим ежедневную деятельность операторов и специалистов, которые участвуют в проведении и обеспечении подготовки.

В информационном смысле определяющим документом являются "Исходные данные на подготовку", содержащие конкретный перечень целей и задач, решаемых в процессе реальной деятельности, функций и ответственности каждого оператора. Этот документ содержит описание практически всех особенностей предстоящей тренировки. При составлении расписания подготовки учитываются образование и опыт операторов, требования к уровню их подготовленности, загрузка тренажерной системы, сроки подготовки и т.п. При этом работа, связанная с планированием, включает в себя следующие процедуры:

- определение необходимого объема подготовки оператора по различным дисциплинам с учетом его опыта и других факторов;
- составление общей программы подготовки (укрупненных планов подготовки);

- определение текущего приоритета (важности) тренировок одного оператора по сравнению с другими;

- составление расписания тренировок на неделю с учетом загрузки тренеров и инструкторов, отпусков и командировок.

В связи с тенденцией увеличения размерности задач планирования подготовки операторов в последнее время становится актуальной задача информатизации процесса организации подготовки операторов. Особенностью данной задачи является то, что большинство исходных данных и результатов планирования содержат основную часть информации в табличной форме. Из этого следуют два основных варианта решения вышеперечисленных информационных задач: использование технологий электронных таблиц, использование компьютерных баз данных.

В настоящее время в связи с расширением опыта разработки баз данных по широкому спектру задач подготовки операторов, сетей персональных компьютеров и возможности общения с системой в диалоговом режиме непосредственно с рабочих мест специалистов открываются реальные перспективы создания и внедрения системы автоматизированного планирования и контроля подготовки операторов.

Аналогичная система была создана, в частности, в составе тренажно-моделирующего комплекса в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина для подготовки космонавтов по программам ДОС "Салют-7" и ОК "Мир". Автоматизированная система планирования и контроля подготовки космонавтов (АСПК ПК) предназначалась для решения задач планирования и управления процессами подготовки космонавтов по всем параллельно осуществляемым космическим программам и являлась системой организационно-административного типа.

В составе тренажно-моделирующего комплекса разрабатывалась также универ-

сальная вычислительно-моделирующая система, информационная и тренажная системы. АСПК ПК базировалась на использовании набора периферийных устройств, позволяющих в комплексе с основными средствами системы производить своевременную и качественную фиксацию, сбор, передачу, обработку и выдачу информации, необходимой для оперативного управления процессом подготовки космонавтов.

Программные средства АСПК ПК обеспечивали реализацию следующих организационных и методических задач.

1. Перспективное планирование подготовки:

- анализ перспективных планов полетов по различным космическим программам;
- разработка перспективного плана подготовки экипажей космонавтов по программам и директивным срокам;
- разработка годовых планов подготовки экипажей космонавтов по программам;
- разработка пятилетних и годовых планов развития тренажной базы.

2. Объемно-календарное планирование подготовки:

- планирование (годовое, квартальное, месячное) подготовки по экипажам и группам экипажей космонавтов;
- разработка сетевых графиков подготовки экипажей космонавтов на комплексе тренажных средств;
- составление недельных расписаний подготовки экипажей космонавтов и групп космонавтов по всем видам подготовки;

- оперативный контроль выполнения планов подготовки и их корректировка.

3. Управление проведением тренировок на комплексных, специализированных и других тренажерах:

- анализ программ полетов конкретных ПКА и разработка на этой основе перечня тренировочных упражнений, подлежащих отработке на комплексных тренажерах;

- определение необходимого количества тренировок каждого экипажа для отработки отдельных упражнений или комплексов упражнений;

- планирование методического обеспечения и отработка действий экипажей при введении возможных аварийных и нестандартных ситуаций;

- учет тренировок по упражнениям и экипажам.

4. Управление и контроль комплексной тренировки с отработкой задач взаимодействия:

- общее планирование комплексной тренировки по отработке совместного функционирования экипажа ПКА и оперативных групп управления полетом в соответствии с программой готовящегося полета;

- планирование состава и взаимодействия рабочих групп обеспечения тренировки и управления полетом;

- составление плана, структуры и форм информационного обмена между рабочими группами;

- планирование введения аварийных и нестандартных ситуаций и др.

5. Подготовка методической документации:

- анализ перспективных и годовых планов подготовки экипажей по всем космическим программам;

- разработка программ подготовки экипажей космонавтов и перечней тренировочных упражнений;

- определение перечня необходимых методических документов для обеспечения тренировок по всем программам;

- учет имеющихся методических документов и пособий и оценка обеспеченности ими программ подготовки;

- формирование требований на разработку новых методических документов;

- разработка новых методических документов и пособий и учет их поступления;

- планирование загрузки специалистов по подготовке экипажей (инструкторов) для обеспечения необходимого коли-

чества экипажей для всех космических программ.

6. Техническое обеспечение тренировок:

- анализ перспективных годовых и квартальных планов подготовки экипажей космонавтов по всем космическим подразделениям;

- анализ перечня тренировочных упражнений по программам подготовки экипажей;

- расчет потребностей всех видов личных тренажеров для обеспечения плановой подготовки экипажей космонавтов;

- разработка графиков загрузки тренажных средств;

- разработка планов и графиков обеспечения тренажных средств персоналом обслуживания в процессе проведения тренировок, регламентных и ремонтных работ и др.

7. Исследование процесса подготовки операторов:

- решение задач комплексного анализа процессов подготовки по всем видам и программам подготовки;

- разработка предложений по рационализации системы и методов подготовки и др.

8. Испытание программ космических полетов:

- анализ предлагаемых программ полетов конкретных ПКА;

- формирование исходного перечня операций, подлежащих выполнению экипажем в полете;

- разработка предложений по рационализации структур деятельности экипажа при выполнении комплекса операций;

- разработка предложений по организации подготовки экипажей по данной программе и др.

9. Эргономическая оценка бортовых систем ПКА:

- разработка методического обеспечения экспериментальных эргономических исследований;

- разработка предложений по совершенствованию бортовых систем и др.

10. Информационно-справочное обеспечение:

- формирование информационно-справочных данных;
- подготовка и выдача оперативной информации о состоянии управляемых процессов и объектов и др.

5.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ НА ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ И ТРЕНАЖЕРАХ

Обучение операторов на тренажерах проходит под руководством инструктора. Инструктор планирует тренировку и управляет ее проведением, контролирует процесс тренировки, оценивает результаты отдельных упражнений и тренировки в целом, определяет уровень подготовленности оператора к выполнению того или иного упражнения.

К достоинству традиционных методов инструкторского контроля и оценки обучения следует отнести оперативность контроля (при ошибке обучаемый немедленно получает информацию об ошибке и рекомендации о способах устранения ее последствий). Инструктор обладает гибкостью подхода к оценке и анализу результатов действий обучаемого на тренажере; опытный инструктор может дать обобщенную характеристику ряда упражнений и оценить уровень подготовки оператора.

Однако инструкторский контроль и оценка имеет ряд недостатков:

- трудность запоминания отклонений и ошибок оператора и анализа количественных показателей уровня подготовленности оператора;
- трудность выявления ошибок и их причин;
- субъективизм оценки действий обучаемого вследствие отличий в методической подготовке инструкторов;
- трудность фиксации и анализа количественных показателей уровня подготовки операторов в процессе формирования навыков.

Для оптимизации процесса обучения и исключения отмеченных выше недостатков необходим автоматизированный контроль и оценка операторской деятельности (АКОД), обеспечивающий решение следующих задач:

- регистрацию действий оператора и контролируемых параметров процесса тренировок;
- анализ действий оператора и обработка контролируемых параметров с целью выявления ошибок обучаемого и их причин;
- расчет показателей деятельности оператора в отдельных упражнениях, сравнение их с эталонными и оценка выполнения упражнений и тренировки в целом;
- накопление информации о результатах тренировок и отдельных упражнениях; определение степени подготовленности оператора к выполнению отдельных упражнений;
- планирование дальнейших тренировок.

Под оценкой операторской деятельности понимается взаимосвязанная совокупность различных способов проведения контроля, анализа и оценки уровня подготовленности операторов с точки зрения их соответствия заданным требованиям.

Контроль, анализ и оценка операторской деятельности находятся в тесной взаимосвязи; они должны осуществляться на основе объективных критериев, учитывающих в конечном итоге вероятность выполнения поставленной перед оператором задачи.

На практике наряду с понятием "оценка результатов тренировки" или "оценка операторской деятельности" на тренажерах чаще употребляется понятие "контроль и оценка..." или "контроль, анализ и оценка...". Этим подчеркивается тесная взаимосвязь задач процессов контроля, анализа и оценки.

С целью обеспечения оперативности контроля и, учитывая, что одни и те же упражнения могут отрабатываться на разных тренажерах, целесообразно на тренажер возлагать не только задачу регистра-

ции, но и задачу обработки регистрируемой информации, а также расчет показателей упражнения, оценок упражнений и тренировок. Накопление же информации о результатах тренировок, определение степени подготовленности операторов и планирование процесса обучения можно выполнять на отдельном комплексе, в который необходимо периодически заносить данные о результатах упражнений, полученные по мере их выполнения на отдельных тренажерах.

С учетом необходимости проведения в процессе тренировки как визуального, так и инструментального контроля действий обучаемых с помощью регистрирующих средств, а также в целях повышения эффективности обучения в составе тренажерной системы необходимо применять средства записи, воспроизведения и демонстрации тренировочных процессов, проводимых на базе тренажерного комплекса. Для этого с помощью регистрирующих средств обеспечивается непрерывная запись контролируемых параметров процесса тренировки, чтобы в последующем имелась возможность качественного и количественного анализа ошибок обучаемого и выявления их причин. При такой организации контроля возможно получение обширной и достоверной информации о действиях оператора с учетом его состояния и затрачиваемых усилий. С помощью полученной информации может быть дана объективная оценка качества управления объектами оператором с учетом его психофизиологической напряженности.

Таким образом, подсистема объективного контроля деятельности обучаемых используется не только для предъявления инструктору-методисту объективных данных о процессе выполнения упражнения и обеспечения возможности анализа и оценки деятельности операторов, но и для разбора тренировки и планирования последующего тренировочного процесса. При разработке данной системы, как следует из рассмотрения выше-

указанных задач, необходимо реализовать следующие функции:

- автоматизированный контроль этапов профессиональной деятельности, определение отклонений в работе операторов и сообщение о них на пульт контроля и управления;
- формирование частных и комплексных оценок качества деятельности на основе заданных объективных критериев;
- оперативный контроль психофизиологического состояния обучаемого;
- обработка и подготовка данных контроля для последующего документирования.

Подсистема документирования должна позволять осуществлять систематизацию, обработку и регистрацию результатов тренировочного процесса в удобной для дальнейшего использования форме.

- С учетом указанных выше задач автоматизированная система контроля и управления тренировкой должна включать следующие подсистемы [149, 157]:
- пультов контроля и управления;
 - записи и воспроизведения тренировок;
 - объективного контроля деятельности и состояния обучаемых;
 - документирования процессов тренировок и результатов контроля деятельности обучаемых.

5.4. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Процесс подготовки операторов в широком смысле является замкнутым. Одной из задач создания методического обеспечения является выявление совокупности знаний и навыков, необходимых для выполнения поставленной задачи, а также умений находить оптимальные пути реализации задач в различных условиях работы. В ходе разработки требований к уровням подготовленности операторов, их знаниям, навыкам и умениям закладываются предпосылки к определенной ме-

тодологии проведения последующего контроля и оценивания подготовленности операторов на основе объективных критериев, учитывающих те или иные показатели деятельности. Следовательно, методы контроля и оценки в большей степени зависят от способа и вариантов структурирования требований к подготовленности операторов, от потенциальных возможностей предлагаемых форм и видов представления требований для их анализа, сопоставления с фактическими характеристиками подготовленности обучаемых, качественного и количественного оценивания уровня навыков и умений.

Здесь под знаниями понимается упорядоченная совокупность сведений фактического или процедурного характера, использование которых делает возможным правильное выполнение оператором работы с управляемым объектом. Под навыком – способность оператора легко и точно выполнять требуемые в процессе работы типовые действия (как правило, стереотипы психомоторного типа). Под умением – способность применения в процессе деятельности комплексных (относящихся к деятельности в целом, а не к отдельной системе) знаний и навыков.

Если говорить об отдельной дисциплине, то в общем случае оценка уровня подготовленности проводится отдельно по каждой компоненте требований, т.е. в соответствии с предлагаемой моделью структурирования требований к подготовленности операторов. С учетом принятых критериев и показателей осуществляется дифференцированное оценивание по каждой компоненте структуры требований с последующим переходом к их интегральной оценке. При этом знания подразделяются на фактические (знания фактов предметной области) и процедурные (знания способов выполнения операций). В основу классификации навыков и процедурных знаний могут быть положены типовые функции операторов, реализуемые в процессе деятельности, а структуру умений оператора можно представить в

виде умений организовывать свою деятельность, умений организовывать взаимодействие и умений действовать в нестандартных ситуациях.

Например, для оценки качества знаний, навыков и умений космонавтов и астронавтов рассматриваются три уровня подготовленности (структурный, функциональный и принципиальный), различающиеся объемом и глубиной знаний, навыков и умений. Для определения критериев оценки уровня подготовленности по каждой типовой функции используется, так называемая, шкала "Обязанности экипажа". Под обязанностями экипажа в данном случае понимается мера нормативных требований к члену экипажа: уметь и безошибочно выполнять стоящие перед ними функциональные обязанности.

В процессе проведения экипажем всех видов занятий и тренировок осуществляется непрерывный контроль, анализ, текущая и периодическая оценка достигнутого уровня подготовленности членов экипажа в целях календарного планирования подготовки и (при необходимости) корректировки программы подготовки. Каждый из периодов и этапов подготовки завершается сдачей зачетов и экзаменов по отдельным дисциплинам, проведением зачетных и комплексных тренировок, предусмотренных программой подготовки, по результатам которых решается вопрос о допуске экипажа к следующему этапу подготовки или к работе на реальном объекте.

Для анализа деятельности экипажей орбитального комплекса "Мир" была разработана специальная технология оценивания деятельности экипажа в космическом полете; на ее основе была создана компьютерная информационная система, которая применялась в системе подготовки экипажей. В этой информационной системе исходными данными для проведения комплексного анализа деятельности

космонавтов является информация о планируемых экипажу работах, оценка качества профессиональной подготовленности космонавтов к их выполнению, а также оценки результатов выполнения отдельных процедур программы полета и причин ошибочных действий экипажа.

В результате экспертных оценок действий экипажей и последующей статистической обработки могут быть получены количественные показатели эффективности их деятельности. Эти показатели позволяют:

- проводить ретроспективный анализ эффективности операторской деятельности с целью выявления статистических зависимостей результатов деятельности космонавтов от различных факторов и обоснование путей дальнейшего ее совершенствования;
- прогнозировать возможность выполнения экипажем нетиповых работ на борту пилотируемого космического аппарата;
- оперативно планировать бортовые тренировки для восстановления навыков.

Такой подход позволяет сделать систему подготовки экипажей гибкой и управляемой за счет наличия обратных связей. Оценка текущего уровня подготовленности космонавтов, а также оперативный анализ состояния орбитальной станции и результатов деятельности очередной экспедиции позволяют оперативно вносить коррективы в процесс подготовки последующих экспедиций и осуществлять ее календарное планирование. С другой стороны, результаты детального послеполетного анализа могут использоваться также для изменения объема и содержания программы подготовки космонавтов на всех ее этапах.

Для реализации задач контроля и оценивания уровней знаний, навыков и умений космонавтов разрабатываются перечни вопросов по каждой теме теоретической подготовки, перечни экзаменационных вопросов и контрольных прак-

тических заданий по разделам (темам) теоретической подготовки, перечни экзаменационных практических заданий.

Выбор критериев и принципов построения системы оценки уровня профессиональной подготовки членов экипажа во многом определяется составом и характеристиками технических средств подготовки, их возможностями.

При оценке уровня профессиональной подготовки космонавтов используются следующие критерии:

- количество правильных ответов из общего числа вопросов, заданных космонавту в процессе текущего, этапного и итогового контроля;
- коэффициент значимости знаний и практических навыков по отдельным разделам (их влияние на обеспечение безопасности экипажа, выживание, выполнение членами экипажа возложенных на них функций, качество и результат выполнения отдельной работы);
- точность выполнения операций (степень соответствия работы космонавта при выполнении практического задания процедурам, изложенным в бортовой инструкции);
- продолжительность выполнения операций (в тех случаях, когда продолжительность выполнения отдельной операции или работы в целом регламентирована);
- степень освоения и использования космонавтом алгоритма оптимальной деятельности при выполнении работы или функции (в качестве критерия оптимальности может выбираться наибольшая вероятность достижения цели при минимуме затрачиваемых усилий и времени);
- интегральная оценка способности космонавтов выполнять функции, возложенные на членов экипажа по эксплуатации и техническому обслуживанию служебной бортовой системы, в том числе определение ситуаций и выбор способов их применения.

На завершающей стадии обучения обычно проводится экзаменационная ком-

плексная тренировка (ЭКТ). После выполнения программы ЭКТ проводится анализ деятельности экипажа и дается заключение, в котором отражаются:

- полнота выполнения программы тренировки;
- введенные в соответствии с билетом нештатные ситуации, реакции экипажа по их обнаружению, локализации и устранению;
- положительные моменты в деятельности экипажа при выполнении тренировочного задания;
- отклонения экипажа от нормы деятельности с анализом их причин и последствий;
- итоговая оценка деятельности экипажа во время ЭКТ.

При определении итоговой оценки в качестве исходных данных используется перечень отклонений от нормы штатной деятельности экипажа и их суммарная оценка (по четырехбалльной системе). Отклонения от нормы штатной деятельности подразделяются на ошибки и замечания.

Ошибки – это отклонение от нормы штатной деятельности, влияющее на выполнение программы полета. Замечание – это отклонение от нормы штатной дея-

тельности, не влияющее на выполнение программы полета. По результатам анализа деятельности экипажа экзаменационная комиссия может принять решение об изменении оценки в пределах балла.

При подготовке операторов на тренажерах важное значение имеет оценка их эмоционального состояния, которая позволяет осуществить прогноз их работоспособности в реальных условиях, факторы которого могут существенно повлиять на способность оператора решить поставленную задачу с необходимыми показателями.

Оптимизация процесса обучения операторов должна осуществляться на основе количественного анализа системы оператор–тренажер и определяющих этот процесс параметров. С целью формулирования наиболее целесообразных приемов действий в каждом конкретном случае может использоваться своя методика анализа и предъявления данных об усваиваемых навыках, исходя из специфики условий и характера выполняемой задачи. Чем глубже анализ результатов действий оператора и чем более осмыслено им выполнение поставленной задачи, тем успешнее развиваются его способности.

ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ НА ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ И ТРЕНАЖЕРАХ

6.1. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ НА ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ И ТРЕНАЖЕРАХ

При подготовке операторов на тренажерных комплексах и тренажерах осуществляется постоянный контроль их действий, в том числе восприятие ситуации, ее осмысливание, формирование необходимых навыков, а также контроль психофизиологического состояния (уровня напряженности) операторов при решении им поставленной задачи.

Оперативный контроль осуществляется инструктором (или инструкторской бригадой) с использованием программно-аппаратных средств пульта контроля и управления, входящего в состав тренажерного комплекса или тренажера, как правило, на всех этапах тренировки. Обычно оценка действий операторов производится частично в процессе тренировки, частично – после ее завершения на основе апостериорного анализа зафиксированных в процессе тренировки показателей.

В зависимости от характера решаемых задач, степени их формализации и требований к тренажеру глубина и масштабы проведения контроля и оценки правильности и эффективности действий операторов могут быть различными.

На рис. 6.1 показаны методы контроля и оценки деятельности операторов на тренажерных комплексах и тренажерах. В ряде случаев предусматривается лишь визуальный контроль со стороны инструктора (видеозапись процесса тренировки); наиболее распространен способ регистрации событий и основных параметров, характеризующих правильность и точ-

ность выполнения операций, в памяти компьютера и последующего документирования; в более совершенных системах для контроля результатов действий операторов используются количественные оценки на основе критериев, учитывающих точностные, временные и надежные показатели деятельности оператора.

При решении задачи организации инструкторского контроля и оценки действий операторов следует выделять методы объективного и субъективного контроля. Субъективный контроль заключается в том, что инструктор, наблюдая за действиями оператора и используя собственный опыт и знания, вырабатывает свое представление о правильности или неправильности действий обучаемого. Те выводы, которые формулирует инструктор, например, в виде записи в формуляре, являются неинструментальной оценкой. В основе такой оценки лежит естественный интеллект, профессионализм инструктора, использование его интуиции в оценке результатов деятельности обучаемого и его состояния.

Хотя данная оценка носит субъективный характер, она имеет первостепенное значение, так как учитывает трудно формализуемые факторы. Опытный инструктор, как правило, хорошо и полно оценивает ситуацию в целом; он дает взвешенную и гибкую интегральную оценку при выполнении ряда последовательных задач.

В то же время субъективному контролю присущи принципиальные недостатки: человек-инструктор имеет ограниченную пропускную способность и в условиях быстро изменяющихся условий не всегда успевает фиксировать и запомни-

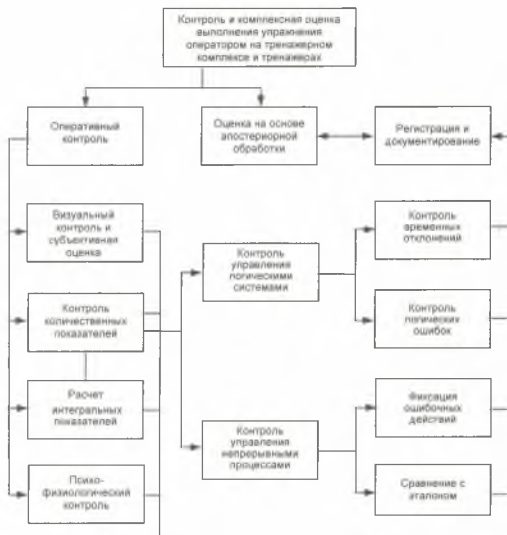


Рис. 6.1. Структура методов контроля и оценки деятельности операторов на тренажерных комплексах и тренажерах

нать отклонения и ошибки (пропускается до 40 % ошибок обучаемых), а также количественные значения важных для оценки параметров. В результате различий в уровне методической подготовки инструкторов имеет место субъективизм в оценке действий обучаемых; иногда инструктор "запрограммирован" на некоторую определенную манеру действий, которая не является наилучшей.

В связи с этим при оценке операторской деятельности все более широко используются методы объективного контроля с применением инструментальных средств, которые создаются на этапе подготовки тренировок. Инструментальные средства обеспечивают фиксацию в процессе тренировки основных параметров, характеризующих действия оператора, а также расчет количественных показате-

лей, которые удастся формализовать. Например, при отработке операции стыковки космических аппаратов в ручном режиме на тренажере фиксируются точностные параметры стыковки (конечная скорость, угловое и линейное отклонение стыковочного узла), превышение времени выполнения операции, расход топлива, нарушения правильности логической последовательности действий.

Применение методов объективного контроля производится с учетом выделения характерных типов операций, которые выполняются операторами. Например, при подготовке к полету на космических тренажерах выделяют задачи выполнения различных динамических режимов, контроля работы объекта в автоматических режимах, управления бортовыми системами, работы с полезной нагрузкой, распознавания нештатных ситуаций и отработки действий по выходу из них.

С точки зрения сущности применяемых методов оперативного контроля целесообразно выделить следующие типовые операции, отрабатываемые операторами на тренажерах:

- управление логическими системами управляемого объекта;
- ручное управление непрерывными процессами;
- наблюдение и фиксация объектов при работе с измерительной, навигационной и научной аппаратурой.

При оценке управления логическими системами управляемого объекта, в частности бортовым оборудованием, должна создаваться формализованная модель деятельности (ФМД) оператора, которая описывает последовательность его действий при выполнении каждой операции на логическом уровне с учетом временных ограничений. В качестве эталонных действий могут быть приняты действия, выполняемые в соответствии с эксплуатационной документацией (бортовой инструкцией), которые фиксируются в виде некоторой структуры данных (таблицы). Опе-

ративный контроль в процессе тренировки состоит в регистрации воздействий оператора на органы управления и определения логических и временных отклонений этих действий от установленных инструкцией.

Логические отклонения определяют на основе сравнения фактических действий операторов с теми действиями по управлению системами, которые регламентированы ФМД. При этом выявляются нарушения последовательности действий, невыполненные обязательные или выполненные недопустимые действия.

Временные отклонения фиксируются, если различие между нормативным (по инструкции) и фактическим временем выполнения той или иной команды превышает допустимый временной интервал.

При оценке ручного управления непрерывными процессами анализируются значения параметров, характеризующих протекание этих процессов. При оперативном контроле параметров управления непрерывными процессами фиксируются неправильные воздействия на органы управления перемещением объекта, выход управляемых параметров за границы допустимой зоны, превышение времени выполнения операций, длительное бездействие и др.

Одна из типовых задач управления непрерывными процессами – управление движением объекта. Например, в режиме ручного управления сближением и стыковкой пилотируемых космических аппаратов осуществляется оперативный контроль значений около двух десятков параметров, в том числе, положения ручек управления по шести степеням свободы углового и линейного перемещения, относительной дальности, скорости сближения, угловых скоростей линии визирования, значений курса и тангажа активного и пассивного объекта в локальной системе координат собственного объекта, относительного крена, угловых скоростей активного и пассивного объекта в связанной

системе координат, расхода топлива и времени выполнения операций.

Существует еще один метод оперативного контроля эффективности управления непрерывными процессами, который заключается в фиксации отклонения параметров моделируемого процесса от значений соответствующих параметров некоторого эталонного процесса управления объектом. В гл. 7 рассматривается, в частности, концепция создания оптимального электронного инструктора, который обеспечивает расчет эталонных траекторий на основе применения методов оптимального управления по выбираемым инструктором критериям качества протекания процесса.

В процессе выполнения оператором задач наблюдения и фиксации различных объектов с применением измерительной и навигационной аппаратуры оперативный контроль заключается в определении правильности фиксации и опознавания объектов наблюдения и точности определения их координат. В частности, в космическом тренажере типовая задача – визирование объекта. Она состоит в том, что объект наблюдения должен быть приведен в центр перекрестия визира и удерживаться там с заданной погрешностью в течение времени измерения его характеристик либо перемещаться в определенном направлении. Сетка координатных осей визира используется дополнительно для фотографирования объекта либо для юстировки узлов научной аппаратуры.

При выполнении упражнения на тренажере фиксируется время входа объекта в начальное поле зрения и приведение объекта в центр визира, абсолютное и относительное время удержания объекта, среднеквадратичное отклонение положения объекта относительно оси визирования и отклонение скорости визирования от заданной, а также математическое ожидание и дисперсия ошибки в фиксации изображения.

При выполнении упражнения на форматах пульта контроля и управления

тренировкой отображается текущая информация, отражающая зависимость углового отклонения объекта от центра визира и зона допустимой погрешности. Эта же информация сохраняется для документирования процесса тренировки. На экран монитора выводится одновременно информация о дискретных событиях (если они имеют место в обрабатываемых ситуациях): о включении и выключении аппаратуры, смене поля зрения визира, режима регистрации и т.д. Комплексное отображение всех показателей позволяет производить сравнение, комплексное оценивание упражнения, выявлять допущенные операторами ошибки.

При подготовке операторов на тренажерном комплексе или тренажере важное значение имеет оценка их эмоционального состояния. Такая оценка позволяет осуществлять прогноз их работоспособности в реальных условиях и учитывать факторы, которые могут существенно повлиять на способность оператора выполнить поставленную задачу с необходимыми показателями. Поэтому в состав тренажера нередко включается система психофизиологического контроля операторов. Вопросы построения такой системы более детально рассматриваются в п. 6.4.

По результатам выполнения отдельных операций и этапов решаемой операторами задачи могут рассчитываться интегральные показатели, которые формируются на основе обобщения локальных показателей (общее количество логических ошибок, количество превышений параметра допустимых границ, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение от заданной траектории и т.д.). Интегральный показатель может формироваться и как балльная нормативная оценка (например, по пятибалльной шкале).

Разумеется, в зависимости от специфики условий и характера выполняемой задачи в каждом конкретном случае формулируются свои требования к объему усваиваемых навыков и наиболее целесо-

образным приемам и действиям. При этом соответственно могут применяться свои методы анализа и способы представления данных для оценки этих действий.

На основании частных оценок по отдельным операциям и этапам тренировки обычно бригада инструкторов производит оценку качества выполнения оператором отрабатываемого упражнения в целом. Эти данные в дальнейшем могут использоваться для оценки тренированности и готовности операторов к работе на реальных объектах.

Чем глубже осуществляется на тренажере анализ результатов действий операторов и чем более осмыслено ими выполнение поставленной задачи, тем успешнее развиваются их способности грамотно эксплуатировать управляемые реальные объекты. Эта задача эффективно решается путем оптимизации процесса обучения на основе количественного анализа функционирования системы тренажер-оператор и параметров, фиксируемых в процессе проведения тренировок. В этих целях в тренажерных комплексах и тренажерах, как правило, обеспечивается возможность запоминания результатов подобного анализа и накопления данных с целью отражения существующих взаимосвязей между различными показателями функционирования, качеством выполнения задач и результатами обучения. Для этого в составе тренажеров создается автоматизированная система оценки операторской деятельности.

6.2. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Система автоматизированного контроля операторской деятельности должна обеспечивать выполнение следующих функций:

- автоматизированный контроль действий операторов на всех этапах тренировки, определение ошибок и отклонений

в их работе и формирование сообщений о них на пульт контроля и управления тренировкой;

- формирование частных и комплексных оценок качества деятельности на основе заданных объективных критериев;
- оперативный контроль психофизиологического состояния операторов;
- обработка данных объективного контроля для последующего документирования.

Структура системы автоматизированного контроля операторской деятельности приведена на рис. 6.2. Все действия операторов и параметры процессов, имитируемых на тренажере, фиксируются в программном комплексе моделирования объекта и внешней среды. Эти параметры являются исходными для проведения автоматизированной оценки действий операторов. В соответствии с выделяемыми типовыми операциями для обработки данных в целях оценки операторской деятельности в реальном масштабе времени создаются по крайней мере два программных комплекса: комплекс контроля управления бортовыми системами (КУБС) и комплекс контроля управления непрерывными процессами (КУНП). В свою очередь, КУБС должен содержать модули логического контроля (контроля логической последовательности управляющих воздействий на органы управления бортовыми системами) и модули временного контроля и фиксации отклонений от нормативного времени выполнения операций.

Комплекс контроля управления непрерывными процессами содержит модули формирования частных оценок данной операции, например, модуль параметрического контроля (МПК), модуль логического контроля (МЛК), модуль временного контроля (МВК), модуль контроля расходования ресурсов (МКР).

Параметрический контроль заключается в фиксации фактов превышения допустимых границ изменения параметров контролируемых процессов и регистрации

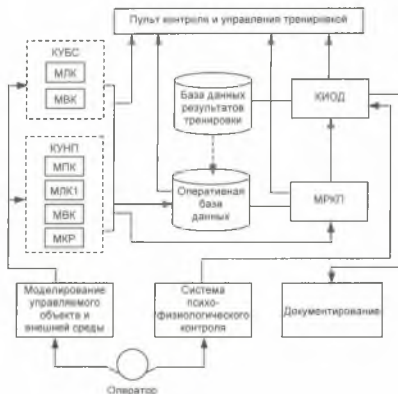


Рис. 6.2. Структура системы автоматизированного контроля операторской деятельности

значений параметров и величины превышения их допустимых значений. Логический контроль состоит в фиксации фактов недопустимо длительного бездействия при необходимости оперативного реагирования на ситуацию, а также в выявлении неверных управляющих воздействий (например, увеличивающих отклонение параметров от нормативных значений).

Временной контроль заключается в сравнении фактического времени выполнения операции с нормативным и фиксации превышения допустимого времени выполнения режима. Контроль расходования ресурсов заключается в вычислении разности начального и текущего значения ресурса (например, топлива) и фиксации превышения допустимого значения для соответствующей операции.

На основании частных оценок, фиксируемых КУБС и КУНП, в программном модуле расчета комплексных показателей (МРКП) производится вычисление комплексных показателей выполняемой операции. Результаты расчетов и данные, фиксируемые в модулях КУБС, КУНП и МРКП, отображаются на мониторах пульта контроля и управления с учетом структуры форматов, которые инициируют члены инструкторской бригады.

Подготовка форматов осуществляется заранее таким образом, чтобы они давали возможность инструктору одновременно наблюдать ход моделируемых процессов, действия операторов и результаты оценки их качества. Кроме отображения результатов контроля все фиксируемые воздействия, параметры и расчетные по-

казатели заносятся в оперативную базу данных. Впоследствии эта информация используется в программном комплексе итоговой обработки данных (КИОД) для систематизации и расчета интегральных показателей качества действий экипажа. На этом этапе могут использоваться и результаты психофизиологического контроля состояния операторов.

Выходные и промежуточные результаты оценки деятельности операторов заносятся в базу данных результатов тренировки. Непрерывная запись контролируемых параметров процесса тренировки дает возможность последующего качественного и количественного анализа ошибок для выявления их причин.

Инструкторы могут в процессе тренировки или после ее завершения ввести дополнительно результаты неинструментальной оценки действий операторов.

Комплекс документирования обеспечивает регистрацию результатов объективного контроля деятельности операторов в удобной для дальнейшего использования форме. Как правило, при документировании выводится на печать протокол тренировки и приложения в виде графиков, отображающих изменение в процессе тренировки контролируемых параметров.

Если после тренировки производится разбор ее хода и результатов, то задокументированные результаты оценки действий операторов используются самостоятельно либо в сочетании со средствами воспроизведения тренировки.

6.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОПТИМАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИНСТРУКТОРА

Одним из методов оценки качества управления непрерывными процессами является сравнение результатов действий операторов на тренажере с возможным наилучшим вариантом реализации его

действий в моделируемой ситуации. Это можно осуществить, если в заданном пространстве состояний объекта будет известна траектория его движения, которая соответствует оптимальному (с точки зрения использования тех или иных критериев) управлению при начальных условиях, сложившихся к моменту выполнения операции. Проблема поиска оптимального управления объектом на тренажере в реальном масштабе времени может быть сформулирована как задача создания оптимального электронного инструктора (ОЭИ) – автоматической системы, которая параллельно с обучаемым (экипажем) выполняет расчет оптимального в смысле минимизации заданных целевых функционалов управления.

На рис. 6.3 представлена структура системы контроля и управления тренировкой с оптимальным электронным инструктором. В предложенных ниже алгоритмах синтеза оптимального управления используется прогнозирующая модель, которая позволяет рассчитывать параметры пространства состояний объекта управления в ускоренном масштабе времени. Результаты расчетов и сравнения результатов оптимального и реализуемого операторами управления используются как средства объективной оценки операторской деятельности и представляются инструктору. Эта информация может также представляться оператору в режиме автоматизированного обучения.

Применение эталонной модели, рассчитываемой с помощью методов оптимального управления, базируется на общности частных структур деятельности человека-оператора и оптимальных (в смысле классических функционалов) систем автоматического управления [81]. Однако ввиду сложности алгоритмов классического оптимального управления и невозможности их компьютерной реализации в реальном масштабе времени для многомерных нелинейных объектов управления данная гипотеза долгие годы оставалась без конструктивного применения.

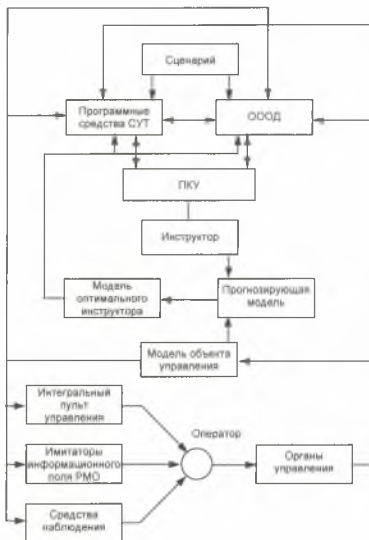


Рис. 6.3. Структура системы контроля и управления тренировкой с ОЗИ

В настоящее время такую задачу удастся решить путем модификации известных алгоритмов на основе применения неклассического функционала обобщенной работы (ФОР), предложенного А.А. Красовским [121]. Алгоритмы, реализующие новый подход, требуют значительно меньших вычислительных затрат и выполнимы в реальном времени. Не менее важно и то, что при минимизации ФОР

получают оптимальное управление с прогнозированием процессов в разомкнутом контуре при фиксированных управляющих факторах. Именно такая структура действий свойственна человеку-оператору согласно фундаментальным психофизиологическим моделям.

Рассмотрим в наиболее общем виде постановку задачи оптимального управления динамической системой.

Под оптимизацией непрерывных процессов управления [121] понимается решение задачи выбора такого управле-

ния

$$u = u(x, t), \quad u \in \mathcal{R}^1, \quad x \in \mathcal{R}^n, \quad t \in [t_0, t_k], \quad (6.1)$$

для динамической системы (объекта управления)

$$\dot{x} = F(x, u, t), \quad (6.2)$$

чтобы на траектории движения $x(t)$, удовлетворяющей заданным условиям начального $x(t_0) = x_0$ и конечного $x(t_k) = x_k$ состояния,

$$\mu(x(t_0), x(t_k), t_0, t_k) = 0, \quad \vartheta \in \mathcal{R}^p, \quad (6.3)$$

а функционал

$$J = H(x(t_0), x(t_k), t_0, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} L(x(\tau), u(\tau), \tau) d\tau, \quad J \in \mathcal{R}^1, \quad (6.4)$$

достигал минимума. Здесь F , μ , H и L – заданные непрерывные векторные и скалярные функции указанных аргументов.

Формулировка задачи (6.1) – (6.4) является достаточно общей для методов вариационного исчисления (в узком понимании этого термина). Основой этих методов является анализ вариаций различных функций

$$\bar{u}(t) = u(t) + \varepsilon \delta_u(t), \quad \bar{x}(t) = x(t) + \varepsilon \delta_x(t), \quad (6.5)$$

и функционалов качества

$$\bar{J}(\bar{x}, \bar{u}) = J(x, u) + \varepsilon \delta J(x, u) + \varepsilon^2 \delta^2 J(x, u) + O(\varepsilon), \quad (6.6)$$

представляющий собой обобщение анализа дифференциалов при исследовании экстремумов функций. Здесь верхней дугой отмечены измененные (проварьированные) значения соответствующих функций и функционала, ε – малый скалярный параметр.

Соотношение (6.6) явно учитывает влияние на значение функционала вариаций управления $\delta_u(t)$ и траектории $\delta_x(t)$. Аналогично можно отразить влияния на функционал (6.4) вариаций начального и конечного состояний в (6.3), а также вариации моментов времени t_0, t_k .

Сложность и многообразие подходов к исследованию вариаций порождают обилие известных методов, способов и рекомендаций для решения указанной задачи, включая классический вариационный подход, принцип максимума, динамическое программирование, приближенные численные методы решения оптимизационных задач, обеспечивающие выполнение необходимых и достаточных условий достижения абсолютного минимума значения функционала (6.4).

Для управления динамическими системами с линейно входящими управлениями эффективно применяется теория аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) [79, 82].

При оптимизации объектов управле-

$$x(t) = f(x, t) + \varphi(x, t)u, \quad x \in \mathcal{R}^n, \quad u \in \mathcal{R}^r, \quad t \in [t_0, t_k] \quad (6.7)$$

в классической теории используются функционал с аддитивными функциями затрат на управление

$$J = F_{\text{зад}}(x(t_k)) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} L(x(\theta), \theta) d\theta + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} U^T(\theta) K^{-1} U(\theta) d\theta. \quad (6.8)$$

Академиком А.А. Красовским предложен, так называемый, неклассический функционал обобщенной работы (ФОР) в виде

$$J = F_{\text{зад}}(x(t_k)) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} L(x(\theta), \theta) d\theta + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} [U_{\text{зад}}(u(\theta), \theta) + U_{\text{опт}}^*(u_{\text{опт}}(\theta), \theta)] d\theta. \quad (6.9)$$

Задача аналитического конструирования заключается в определении уравнения (6.1) для объекта (6.7), доставляющего минимум классическому (6.8) или неклассическому (6.9) функционалам при произвольных (фиксированных) начальных условиях $x(t_0) \neq 0$. По сути постановка оптимизационной задачи сужена следующими обстоятельствами:

- уравнения объекта управления представимы в виде (6.7);
- область возможных значений управляющих воздействий в $\mathbb{R}^1$ является незамкнутой;
- все возможные переходные функции объекта управления (6.2) непрерывно дифференцируемы в $\mathbb{R}^n$;
- минимизируемый функционал (6.8) или (6.9) является выпуклым относительно управления u (а также $u_{\text{опт}}$);
- задача формулируется только как задача с закрепленным левым и свободным правым концами.

При классическом функционале (6.8) метод АКОР сводится к решению уравнения Беллмана:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f - \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial x} \Phi K^{-1} \Phi^T \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T = -Q_{\text{опт}}, \quad (6.10)$$

с граничными условиями $V(t_k) = V_{\text{зад}}(x(t_k))$, $V'(t_k) = V'(x(t_k))$ и с использованием закона управления

$$u_{\text{опт}} = -K^{-1} \Phi^T \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T. \quad (6.11)$$

В общем случае решение уравнения (6.10) встречает известные трудности, как и почти всякое нелинейное уравнение в частных производных.

В формулировке А.А. Красовского задача минимизации неклассического функционала (6.9) сводится к решению уравнения Ляпунова:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f = -Q_{\text{зад}}, \quad (6.12)$$

При одинаковых предположениях (отсутствие дополнительных ограничений, накладываемых на управление $u(t)$ и траекторию $x(t)$ задача Больца

$$\min \left[V_{\text{зад}}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} L(x(\theta), u(\theta), \theta) d\theta \right], \quad (6.13)$$

$$x(t) = f(x(t), u(t), t), \quad x \in \mathbb{R}_n,$$

при любом методе решения (классическое вариационное исчисление, принцип максимума, динамическое программирование) приводит к одинаковым необходимым условиям локального минимума в виде уравнений Эйлера–Лагранжа:

$$x(t) = f(x(t), u(t), t), \quad (6.14)$$

$$\lambda(t) = - \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} \right)^T \lambda(t) - \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u} \right)^T, \quad \lambda \in \mathbb{R}^n, \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u} + \lambda^T(t) \frac{\partial f}{\partial u} = 0 \quad (6.16)$$

при граничных условиях

$$x(t_0) = x_0, \quad \lambda(t_k) = \frac{\partial V_{\text{зад}}(x(t_k), t_k)}{\partial x}, \quad (6.17)$$

Уравнение объекта управления (6.14), где u определяется из алгебраического соотношения (6.16), решается совместно с сопряженным уравнением (6.15) на интервале (t_0, t_k) при выполнении двухсторонних граничных условий (6.17). Решение уравнений (6.15) – (6.16) при начальном условии $x(t_0) = x_0$ и каком либо значении $\lambda(t_k)$ можно рассматривать как прогнозирование на интервале (t_0, t_k) для системы $2n$ -го порядка. Таким образом, задача прогнозирования движения замкнутой системы является составной частью задачи оптимизации при классическом функционале, однако далеко не исчерпывает эту задачу, так как для нахождения оптимального управления здесь

необходимо еще удовлетворить граничному условию (6.17) на правом конце.

Традиционным универсальным численным методом удовлетворения двухсторонних краевых задач является метод многократных решений (последовательных приближений) с минимизацией невязки на правом конце. Это означает многократное решение уравнений (6.14)–(6.16) с последовательной минимизацией нормы разности

$$\left\| \lambda(t_2) - \frac{\partial V_{\text{зад}}(x(t_2), t_2)}{\partial x} \right\|. \quad (6.18)$$

Число "прогонов" для решения этой задачи может быть достаточно большим.

Алгоритм управления (6.11), (6.12), вытекающий из минимизации ФОР (6.9) для объекта (6.7), наряду с отмеченными выше невысокими потребными вычислительными затратами обладает еще одним полезным свойством. Решение уравнения в частных производных (6.12) может быть построено на сравнительно небольшом числе прогнозов движения объекта [83]. В предложеном в работе [43] методе характеристик искомое решение строится на интегральных кривых, удовлетворяющих обыкновенным дифференциальным уравнениям

$$\dot{x}(t) = f(x, t), \quad (6.19)$$

$$p = - \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T, \quad p = - \left(\frac{\partial Q_{\text{зад}}}{\partial x} \right)^T \quad (6.20)$$

при граничных условиях

$$x(t_0) = x_0, \quad (6.21)$$

$$p(t_k) = \left(\frac{\partial V_{\text{зад}}}{\partial x} \right)^T. \quad (6.22)$$

Здесь $p(t) = (\partial V / \partial x)^T$ – вектор частных производных функции $V(x, t)$ по компонентам вектора состояния. При вычислении функции $V(x, t)$ на свободной траектории из (6.17) вытекает соотношение

$$\dot{V}(t) = -Q_{\text{зад}}(x, t). \quad (6.23)$$

Уравнения (6.19), (6.20) и (6.23) легли в основу алгоритмов с прогнозирующей моделью [121]. Суть этих алгоритмов сводится к тому, что на основе интегрирования данных уравнений строится решение уравнения (6.12) и тем самым решается оптимизационная задача (6.7), (6.9). Следует отметить, что подобный способ решения задачи ориентирован на поиск структуры функции $V(x, t)$ в области ее определения в пространстве "Я", как это имеет место при реализации многих других способов, а на вычисление значения функции $V(x, t)$ лишь в некоторой окрестности текущего состояния. Размер и топология этой окрестности выбираются таковыми, чтобы с приемлемой точностью можно было вычислить градиент $\partial V / \partial x$ и использовать для вычисления оптимального управления.

Применение функционала обобщенной работы позволяет более чем на два порядка снизить вычислительную сложность задачи синтеза оптимального управления и открывает возможность реализации рассмотренных алгоритмов в реальном масштабе времени. Практическое применение того или иного метода решения задачи зависит от характера объекта управления и выбираемых критериев.

В гл. 7 иллюстрируется применение данных методов для решения некоторых задач управления пилотируемыми космическими аппаратами.

6.4. СИСТЕМА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРОВ

При подготовке операторов на тренажерных комплексах и тренажерах необходимо учитывать специфику реагирования человека на различные виды нагрузок и тот факт, что от функционального состояния оператора в значительной мере

зависит его работоспособность, динамика изменения степени утомления и, в конечном счете, качество выполняемых операций. Особенно большое значение имеет повышенное эмоциональное напряжение оператора, возникающее в нештатных ситуациях, и даже при выполнении знакомых операций в условиях дефицита времени. Оно может приводить к дезорганизации деятельности, преждевременным реакциям, нарастанию ошибок, развитию утомления за счет избыточных энергетических затрат.

Поведение оператора в стрессовых ситуациях существенно зависит от его личностных характеристик и типа нервной системы. При недостаточной психофизиологической устойчивости в случае усиления эмоциональных переживаний и появления напряженности у оператора наблюдаются нецелесообразные действия, нарушается способность восприятия управляющих сигналов и директивной информации. Иногда это приводит к паническому поведению и срыву с неизбежными негативными последствиями.

Поэтому на тренажерных комплексах и тренажерах наряду с объективной оценкой качества выполнения операций важно контролировать физиологическое состояние оператора, в частности, уровень его напряженности в процессе выполнения обрабатываемой задачи.

Специалисты отмечают, что если даже оператор успешно справился с задачей и выполнил упражнение с хорошими показателями, но на пределе психологических возможностей, то результаты нельзя считать удовлетворительными, так как при управлении реальным объектом в аналогичной ситуации не исключается срыв и невыполнение поставленной задачи. Психофизиологический контроль необходим также и в случаях, когда выполняемая оператором задача сопряжена с риском для здоровья и жизни человека (например, при работе космонавта в скафандре, на центрифуге и т.д.).

Для учета уровня психологической напряженности операторов в процессе тренировки и контроля опасных для него состояний в составе тренажерного комплекса и тренажеров создаются автоматизированные системы психофизиологического контроля операторов.

Принципиально возможны различные подходы к решению задачи контроля состояния операторов, например, использование:

- датчиков и медицинской аппаратуры для съема и обработки электрофизиологических сигналов, характеризующих состояние оператора;
- видеонаблюдения за глазами обучаемых для контроля опасных состояний;
- голосовых анализаторов стресса для психологического контроля.

Наиболее широко применяется первый из указанных методов. Он позволяет рассчитывать ряд физиологических показателей, которые дают возможность сформировать своеобразный психофизиологический портрет обучаемого и оценить динамику изменения его состояния во времени. Недостатком этого метода является необходимость подключения к обучаемому множества датчиков, связанных с вычислительным комплексом и ограничивающих его перемещения. Так как датчики крепятся непосредственно на теле оператора, то при этом возникает проблема обеспечения безопасности от поражения электрическим током в случае неисправности аппаратуры.

Если на тренажере не создаются сверхвысокие нагрузки на обучаемых, то для контроля опасных состояний можно ограничиться видеонаблюдением за глазами обучаемых, применяя простейшие диагностические признаки: неподвижный взгляд, опущенные веки, расширение зрачка до определенного размера, большего, чем позволяют условия освещенности, и т.д. Недостатком данного подхода является отсутствие методики анализа данной диагностической информации.

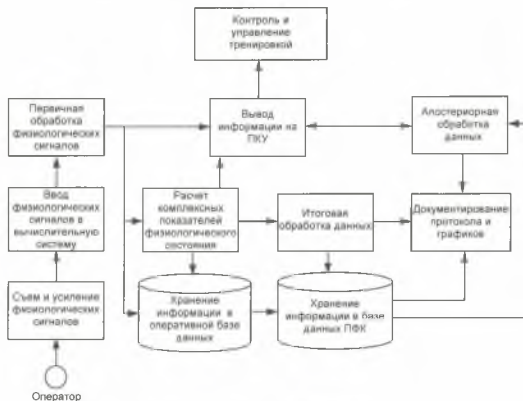


Рис. 6.4. Функциональная структура системы психофизиологического контроля оператора

В США и других странах в правоохранительных органах, службах безопасности и в медицинской диагностике широко применяются приборы, осуществляющие обработку речевых сигналов по технологии психофизиологического определения стресса PSE. В тренажерах для этих целей можно использовать акустические каналы переговоров с экипажем.

В настоящее время наиболее разработанными и информативными являются методы психофизиологического контроля, основанные на анализе параметров дыхания, ритма сердца, кожно-гальванической реакции, пульса, артериального давления и температуры тела. При определении состава контролируемых электрофизиологических сигналов (ЭФС) часто ориентируются на использование той медицин-

ской аппаратуры, которая применяется в штатных изделиях. Например, в космических тренажерах используется медицинский пояс космонавтов, который обеспечивает, в частности, съем электрокардиограммы (ЭКГ) и пневмограммы (ПГ). Из электрокардиосигнала можно выделять RR-интервалы для анализа ритма сердца или межсистолические интервалы сигнала пульса.

В общем случае для контроля состояния оператора можно использовать также пневмограмму, сфигмограмму, данные измерения артериального давления и др.

При создании в составе тренажерного комплекса или тренажера системы психофизиологического контроля на нее возлагаются следующие функции:

- ввод и регистрация физиологической информации с комплекса аппаратуры медицинского контроля;
- многоканальная обработка электрофизиологических сигналов; расчет и отображение показателей состояния операторов;
- контроль опасных состояний;
- ведение баз данных психофизиологического контроля;
- итоговая статистическая обработка результатов контроля операторов в течение тренировки.

Функциональная структура системы психофизиологического контроля операторов приведена на рис. 6.4. С помощью датчиков и медицинской аппаратуры производится съем электрофизиологических сигналов с оператора, и, после усиления, они вводятся в вычислительную систему. Далее производится первичная обработка данных, в результате которой из электрофизиологических сигналов выделяются информативные признаки. В качестве информативных признаков может использоваться средняя длительность RR-интервалов, отношение амплитуд зубцов Т и R ЭКГ, средняя продолжительность фаз активного вдоха и выдоха, частота сердечных сокращений, частота дыхания и артериальное давление.

На основе полученных значений информативных признаков производится вычисление комплексных показателей физиологического состояния оператора. В качестве интегральных показателей могут использоваться показатели ритмичности, индексы вегетативного равновесия, индексы напряженности Баевского, корреляционная функция и спектральная плотность кардиоинтервалов. Введенные в систему электрофизиологические сигналы, выделенные информативные признаки и комплексные показатели заносятся в оперативную базу данных и отображаются на пульте инструктора.

В процессе тренировки операторов производится накопление и статистическая (итоговая) обработка данных; ре-

зультаты этой обработки заносятся в базу данных ПФК. После завершения тренировки данные психофизиологического контроля выводятся на твердые носители в виде протокола и приложения к нему. В случае необходимости должна предусматриваться апостериорная дополнительная обработка данных, обеспечивающая сравнение результатов разных тренировок и операторов и анализ динамики изменения показателей. Итоговую обработку данных психофизиологического контроля желательно увязывать с показателями объективной оценки действий операторов в процессе тренировки.

Структура технических средств системы психофизиологического контроля операторов показана на рис. 6.5. Непосредственное измерение физиологических сигналов оператора осуществляют медицинские приборы (МП), которые включают в свой состав датчики для съема сигналов и усилители. Для обеспечения электробезопасности в соответствии с ГОСТами на медицинские изделия медицинские приборы изготавливаются с закрытым корпусом из изолирующего материала. Кроме этого, для исключения попадания на оператора высокого напряжения по цепям ввода физиологических сигналов в канал ввода устанавливаются устройства гальванической развязки на основе оптоэлектронной пары, содержащей светодиод и фотоприемник. В некоторых системах для повышения комфортности оператора и развязки электрических цепей используют аппаратуру ближней телеметрии (приемопередающие устройства радиоканала). Далее электрофизиологические сигналы, снимаемые со всех операторов, через коммутатор и аналого-цифровые преобразователи передаются в вычислительную систему для последующей обработки.

Частота опроса датчиков определяется частотными характеристиками снимаемых сигналов: при вводе электрокардиограммы и сфигмограммы она выбирается в диапазоне 100...250 Гц; при вводе артериального давления – 50 Гц; при вводе

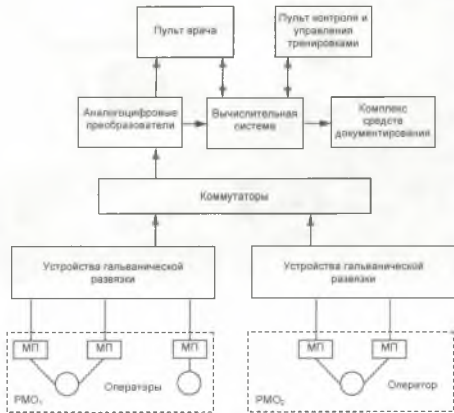


Рис. 6.5. Структура технических средств системы психофизиологического контроля

пневмограммы – 5...10 Гц; при вводе температуры тела – 1 Гц.

Если в соответствующей области деятельности вопросы медицинского контроля имеют достаточно большое значение, то в составе комплекса целесообразно использовать специализированный пульт врача (рис. 6.6). Рабочее место врача оборудуется средствами отображения и регистрации психофизиологической информации, а также средствами наблюдения графиков электрофизиологических сигналов и самих операторов. На пульте врача могут устанавливаться осциллоскопы, графические и магнитные регистраторы. При отсутствии пульта врача психо-

физиологическая информация отображается в отдельных форматах или окнах на мониторах пульта контроля и управления тренировкой.

Так как каналы психофизиологического контроля различных операторов абсолютно идентичны, они выполняются как унифицированные компоненты системы и могут использоваться в режиме коллективного пользования. В тренажерном комплексе достаточно, в частности, использовать один или два пульта врача для обеспечения психофизиологического контроля на всех тренажерах комплекса.

Программные средства системы психофизиологического контроля операторов



Рис. 6.6. Внешний вид пульта врача

имеют модульную структуру в соответствии с описанной выше функциональной схемой, приведенной на рис. 6.4. Из анализа задач СПФК следует, что программное обеспечение этой системы необходимо разделять на две части, предназначенные для обработки физиологической информации в оперативном и апостериорном режимах (в процессе тренировки и после ее завершения).

В оперативном режиме используются программные модули, обеспечивающие первичную обработку сигналов, текущее накопление информации и выделение информативных признаков, расчет интегральных показателей, архивирование и документирование данных (отмеченных инструктором участков съема физиологических сигналов и комплексных показателей) для последующего более углубленного анализа в апостериорном режиме. В процессе первичной обработки обычно рассчитываются статистические характеристики снимаемых с операторов сигналов. Например, при обработке электро-

кардиосигнала для анализа ритма сердца рассчитываются следующие статистические характеристики: математическое ожидание величины RR-интервалов, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент корреляции смежных RR-интервалов, коэффициент вариации, мода и др.

Системные средства тренажерного комплекса обеспечивают одновременную обработку и информационную связь параметров моделирования и психофизиологических параметров для выявления причин отклонения показателей психофизиологического состояния от нормальных значений. С учетом выбранных для отображения форматов результаты обработки (например, графики частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, рассчитанные показатели, статистические характеристики) выводятся на экран дисплея. Врач имеет возможность фиксировать отдельные фрагменты электрофизиологических сигналов для архивирования.

Программный модуль, обеспечивающий обработку психофизиологиче-

ской информации в апостериорном режиме, использует базу данных психофизиологического контроля операторов, сформированную в оперативном режиме. Он позволяет осуществлять дальнейшую более глубокую обработку и анализ накопленных при проведении тренировки данных, производить просмотр, сортировку, сравнение, выявление особенностей и тенденций, а также формировать отчеты, содержащие данные о психофизиологических показателях операторов и их изменении на заданном временном интервале.

С точки зрения временных ограничений, предъявляемых к программному комплексу СПФК, все прикладные модули следует разбить на две группы. Первая группа включает задачи жесткого реального времени, обеспечивающие непрерывное циклическое измерение параметров психофизиологического состояния операторов, их усреднения и фиксации в базе данных. Такие задачи характеризуются фиксированным периодом запуска и жестким ограничением времени их выполнения (задача должна быть завершена к моменту ее запуска в следующем такте). Нарушение этого требования приводит к потере информации.

Вторую группу задач (формирование комплексных показателей, отображение информации на экране, запись данных на внешние носители, апостериорная обработка информации) можно отнести к классу аperiodических; допустимое время их выполнение больше (от нескольких миллисекунд до нескольких минут). Такие задачи не должны занимать ресурсы комплекса в моменты выполнения более приоритетных периодических задач.

Таким образом, система психофизиологического контроля операторов строится как многозадачная программная система жесткого реального времени с многоприоритетной дисциплиной обслуживания. Периодическим задачам присваивается высший абсолютный приори-

тет, а остальным – относительные приоритеты различных уровней (в зависимости от обеспечиваемых функций и времени выполнения задачи).

Информационная связь между всеми программными модулями системы обеспечивается системной оболочкой комплекса на основе информационных файлов согласованной структуры, которые должны содержать идентификационные сведения об операторах, текущие и комплексные показатели психофизиологического состояния и адреса потребителей информации.

6.5. ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИРОВКИ

Задача записи и воспроизведения тренировки заключается в фиксации и сохранении информации о ее ходе и параметрах для того, чтобы после проведения тренировки инструктор имел возможность повторить весь ход тренировки, ее отдельные фрагменты или моменты в целях более глубокого анализа действий экипажа и результатов выполнения упражнения. Это также дает возможность показать обучаемым после тренировки, какие их действия были правильными и эффективными, какие были допущены просчеты и ошибки при выполнении задания.

Для решения указанной задачи можно использовать различные по степени сложности варианты технических решений. Наиболее простой вариант состоит в регистрации (в отдельные моменты времени, например, через каждые 20 с) и сохранении в выделенном разделе памяти заранее определенного набора параметров, характеризующих протекание тренировки. Последовательность этих срезов информации в зафиксированных временных точках воспроизводится после тренировки. Естественно, что в этом случае ход тренировки в промежутках между зафиксированными моментами не воспроизводится.

Другой способ построения системы записи и воспроизведения тренировки заключается в фиксации информации, отображаемой при проведении тренировки на пульте контроля и управления тренировкой. При этом в случае любого изменения информации, отображаемой на форматах пульта, производится запись в выделенном разделе памяти соответствующего формата с регистрацией времени его появления. Кроме этого, осуществляется непрерывная видеозапись той информации, которая отображается на видеомониторах пульта контроля и управления тренировкой. Такой способ записи позволяет воспроизводить весь ход тренировки (или выбранного ее интервала), однако практически отсутствует возможность после записи что-либо изменять и анализировать другие траектории управляемого процесса.

Предпочтительным, на наш взгляд, является способ построения системы записи и воспроизведения, который заключается в том, что при воспроизведении тренировочного процесса используется тот же комплекс моделирования управляемых объектов и среды, который применяется при проведении самой тренировки. Рассмотрим более подробно этот способ реализации системы.

В основе построения системы записи и воспроизведения тренировки лежит понятие контрольной точки, которая представляет собой совокупность сведений, отражающих текущее состояние процесса и содержащих значения параметров моделируемых систем (на момент сохранения), дату тренировки, модельное время, определяющее срез состояния, и произвольный комментарий, облегчающий пользователю идентификацию контрольной точки.

Таким образом, контрольная точка содержит ту информацию, которая необходима для фиксации ситуации и возможности повторения моделируемых процессов с данного момента. Контрольные точки можно фиксировать автоматически с заданным интервалом либо по инициативе инструктора.

После сохранения контрольной точки системные средства программного комплекса начинают вести запись всех поступающих дискретных сообщений, помещая их в специально выделяемую для этого очередь инициатив. В очередь инициатив заносятся входные управляющие воздействия от операторов и инструкторов, а также события, изменяющие параметры моделирования внешней среды. Фиксация указанных событий и управляющих воздействий производится с привязкой к модельному времени их поступления.

Для воспроизведения записанного процесса необходимо загрузить контрольную точку (т.е. воссоздать зафиксированную в момент формирования контрольной точки ситуацию) и осуществить одновременный запуск всех процессов моделирования ситуации так же, как в процессе тренировки. Однако в отличие от первоначально записываемого процесса, при воспроизведении средства ввода команд от операторов и инструкторов блокируются и производится постоянный просмотр очереди инициатив.

При воспроизведении модельное время вновь отсчитывается с момента, зафиксированного в контрольной точке. Когда его текущее значение совпадает со временем очередного события в очереди инициатив, код данного события поступает на вход соответствующих моделей, обеспечивая ту же реакцию, которая имела место в записанной тренировке. Таким образом, записанный процесс тренировки полностью повторяется.

При восстановлении контрольная точка не стирается, поэтому процесс воспроизведения может повторяться многократно.

Если тренировка реализуется на базе многомашиной вычислительной сети, то необходимо выделить главный узел, который будет держателем информации о контрольных точках. Остальные узлы в момент фиксации контрольной точки передают на главный узел параметры состояния моделей, обеспечивающих проведе-

ние тренировки, а главный узел записывает состояние новой контрольной точки на свободное место в стеке, а затем копирует эту информацию в буфер для сохранения ее на жестком диске.

Информация о контрольной точке снабжается заголовком, который используется для идентификации сохраненных точек и синхронизации записей о контрольных точках во всех узлах сети. После сохранения контрольной точки пользователь может ввести строку комментария к ней; эта строка дописывается в заголовок.

Запись последующих событий в очереди инициатив осуществляется в каждом активном узле сети, а после поступления команды о прекращении записи (при фиксации следующей контрольной точки) сохраняется на главном узле сети.

Выбор начальной точки для воспроизведения производится по заголовку (указанному номеру контрольной точки или моменту модельного времени начала воспроизведения). По команде на воспроизведение тренировки главный узел сети считывает из файла контрольных точек соответствующие заданной точке значения расчетных параметров моделей на данном срезе, а также соответствующие блоки очереди последующих инициатив и рассылает эту информацию тем узлам, на которых реализуются соответствующие модели.

После восстановления состояния моделей на всех узлах сети главный узел устанавливает считанное из контрольной точки модельное время и выдает команду синхронизации для выравнивания значения времени на всех узлах сети. При переходе в режим "Пуск" начинается автоматическая обработка очереди инициатив, в результате чего работа моделей полностью повторяет записанный процесс тренировки. Таким образом, процесс воспроизведения осуществляется автоматически с любой контрольной точки, сохраненной на этапе проведения тренировки.

Описанный способ построения системы записи и воспроизведения тренировки позволяет осуществлять не только повторение записанной тренировки, но и проводить показательный разбор альтернативных действий операторов (и более эффективных, и менее удачных). Так как при воспроизведении записанной тренировки полностью повторяется моделирование управляемого объекта и внешней среды, инструктор в любой момент времени может разблокировать подачу управляющих воздействий, и оператор имеет возможность повторно выполнить отработываемую задачу с учетом рекомендаций инструктора. Эти действия так же, как при проведении основной тренировки, вновь могут записываться и подвергаться последующему анализу. Инструктор может в любой момент времени "взять управление на себя" и выполнить показательный процесс управления объектом в отработываемой ситуации.

Записанные фрагменты можно эффективно использовать также на лекциях и практических занятиях.

Несмотря на то, что создание системы записи и воспроизведения тренировки сопряжено с дополнительными затратами, ее применение существенно расширяет методические возможности тренажера и безусловно окупает все затраты. Об этом свидетельствует опыт успешной эксплуатации данной системы в составе тренажерных комплексов для подготовки космонавтов в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина.

Следует отметить, что средства системы записи и воспроизведения тренировки выполняются в виде унифицированных программных модулей, и в составе тренажерного комплекса они загружаются для каждого работающего тренажера как однотипные параллельные процессы. Таким образом, по отношению к данной системе также эффективно реализуется принцип однократного создания и многократного использования создаваемых тренажерных средств.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ИНСТРУКТОР ДЛЯ ОТРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

7.1. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОЗИ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ОПЕРАЦИЙ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СБЛИЖЕНИЕМ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Применение эталонной модели для обучения экипажа выполнению некоторой динамической операции связано с поиском алгоритма оптимального управления, обеспечивающего реализацию такой траектории движения управляемого объекта, которая является наилучшей с точки зрения заданного критерия качества. При построении оптимального электронного инструктора будем преимущественно использовать алгоритмы оптимизации на базе неклассического функционала обобщенной работы с прогнозирующей моделью (см. п. 6.3) и матрицей чувствительности.

Решение данной задачи применительно к оптимизации управления космическими аппаратами (КА) имеет ряд особенностей, обусловленных способом формирования управляющих моментов, которые могут одновременно формироваться двигателем управления в импульсном режиме, отклоняемым вектором тяги, работающим в непрерывном режиме, и двигателями ориентации, работающими в импульсном режиме. Это не позволяет непосредственно использовать методы синтеза оптимальных систем, рассмотренные в п. 6.3.

Поэтому требуется модификация алгоритма с прогнозированием, ориентированная на формирование оптимального управления с учетом следующих типовых управляющих воздействий КА:

– релейно-импульсное управление;

– смешанное непрерывное и релейно-импульсное управление.

Рассмотрим задачу построения ОЗИ для управления КА при сближении с другим КА, имеющим стабилизированную ориентацию [34, 88]. Если пренебречь разницей гравитационных ускорений сближаемых КА, то их относительное движение в плоскости орбиты описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= x_2, & \ddot{x}_2 &= a_1 a_2^2 + a_1, \\ \ddot{x}_3 &= \frac{1}{x_1} (a_3 - 2x_2 x_3), & \ddot{x}_4 &= x_3, \end{aligned} \quad (7.1)$$

где x_1 – дальность; x_2 – продольная скорость сближения; x_3 – угловая скорость линии визирования; x_4 – угол между продольными осями КА и цели; a_1, a_2 – ускорения, создаваемые двигателями КА соответственно вдоль и поперек линии визирования. Процесс сближения иллюстрирует схема, представленная на рис. 7.1 (см. цветную вкладку).

Необходимо перевести транспортный корабль из начального состояния, соответствующего моменту t_0 , в конечное состояние, предшествующее стыковке, за некоторое заданное время $(t_f - t_0)$ при ограничении, накладываемом на допустимое расстояние между стыкуемыми кораблями ($x_1 \leq x_{\text{дон}}$).

В общем виде уравнение движения управляемого объекта будем рассматривать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= f(x, t) + \Phi(x, t) \theta, \\ \theta &= u, \end{aligned} \quad (7.2)$$

где x – n -мерный вектор состояния объекта; ϑ – s -мерный вектор положения релейных рулевых органов; u – m -мерный вектор сигналов управления.

При использовании ручек управления движением КА каждая компонента вектора ϑ_p может принимать только два значения.

Представим компоненты ϑ_{pi} вектора ϑ_p функциями времени вида

$$\vartheta_{pi}(t, t_{i0}, t_{i1}, \dots, t_{iM_i}) = \vartheta_{pi0} - \Delta_{pi} \sum_{\mu=1}^{M_i} (-1)^\mu 1_i(t - t'_{i\mu}), \quad (7.3)$$

где ϑ_{pi0} – одно из значений компоненты ϑ_{pi} , принимаемое за исходное, т.е. это такое значение, которое соответствует положению i -го релейного рулевого органа в начальный момент времени; Δ_{pi} – приращение скачкообразного изменения i -й компоненты с учетом знака изменения; $1_i(t - t'_{i\mu})$ – единичная ступенчатая функция, соответствующая μ -му по порядку изменению компоненты ϑ_{pi} ; M_i – число рассматриваемых скачкообразных изменений функции (7.3). Функцию (7.3) можно рассматривать как предельную последовательности функций

$$d_{pi}(t) = \vartheta_{pi0} - \Delta_{pi} \sum_{\mu=1}^{M_i} (-1)^\mu \times \times \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg k(t - t'_{i\mu}) \right] \quad (7.4)$$

при неограниченном возрастании k .

В (7.3) и (7.4) варьируемыми параметрами являются число переключений M_i и моменты переключения $t'_{i\mu}$. Число учитываемых переключений будем полагать априорно выбираемым параметром алгоритма (наряду с параметрами минимизируемого функционала). Моменты переключения функции (7.3) будем рас-

сматривать в качестве компонент обобщенного объекта управления, полученного объединением (7.2) и уравнений

$$\dot{t}'_{i\mu} = u_{j\mu}. \quad (7.5)$$

Уравнение (7.5) описывает перестройку момента $t'_{i\mu}$ μ -го переключения i -й компоненты вектора ϑ_p . Если m – размерность вектора ϑ_p , то следует записать

$\sum_{i=1}^n M_i$ уравнений (7.5). Размерность обобщенного объекта управления в этом

случае составит $n + \sum_{i=1}^n M_i$. Если ввести

обозначение: T_p – вектор, компонентами которого являются параметры $t'_{i\mu}$, то для обобщенного объекта (7.2)–(7.5) можно записать

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t) + \varphi(x, t) \vartheta_p(t, T_p), \\ \dot{T}_p &= u. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Таким образом, рассматриваемый случай формально сведен к управлению объектом (7.2), однако следует иметь в виду, что дифференцирование уравнений объекта по T_p требует в силу (7.3) специальных приемов.

Один из вариантов алгоритма управления с прогнозирующей моделью заключается в следующем [24].

Оптимальное управление должно обеспечивать минимум функционалу

$$\begin{aligned} I &= V_k(x(t_k), t_k) + \int_{t_0}^{t_k} Q(x(\tau), \tau) d\tau + \\ &+ \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} (u' K^{-1} u + u'_{\text{опт}} K^{-1} u_{\text{опт}}) d\tau, \end{aligned} \quad (7.7)$$

где V_k и Q – положительно определенные функции вектора x ; K – неотрицательно

определенная матрица, определяется соотношением

$$u_{\text{опт}} = -K \left[Z^T(t_k) \frac{\partial W(t_k)}{\partial x_m(t_k)} + \int_{t_k}^{t_0} Z^T(\tau) \frac{\partial Q(\tau)}{\partial x_m} d\tau \right], \quad (7.8)$$

где $u_{\text{опт}}$ – m -мерный вектор пока неизвестных оптимальных управлений; t_0, t_k – моменты времени начала и окончания процесса управления; $x_m(\tau)$ – состояние объекта на интервале $[t, t_k]$, прогнозируемое в ускоренном времени τ с помощью модели

$$\frac{d}{dt} x_m = f(x_m, \tau) + \varphi(x_m, \tau) \vartheta_m, \quad \frac{d}{dt} \vartheta_m = 0, \quad (7.9)$$

при начальных условиях $x_m(t) = x(t)$, $\vartheta_m(t) = \vartheta(t)$; $Z(\tau)$ – матричная функция, удовлетворяющая уравнению

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} Z = \frac{\partial}{\partial x_m} \times \\ \times [f(x_m, \tau) + \varphi(x_m, \tau) \vartheta_m] Z + \varphi(x_m, \tau) \end{aligned} \quad (7.10)$$

при граничном условии $Z(t) = 0$. Здесь штрихом отмечена операция транспонирования.

С использованием моментов t_μ^i переклЮчения функций (7.3) уравнения прогнозирующей модели будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x_m = f(x_m, \tau) + \varphi(x_m, \tau) \vartheta_{pm}(t, T_p), \\ \frac{d}{dt} T_p = 0, \end{aligned} \quad (7.11)$$

где T_p – вектор, компонентами которого являются значения моментов переклЮчения функций (7.3) в ускоренном времени τ на интервале прогнозирования (оптимизации) $[t, t_k]$, $f(x_m, \tau) + \varphi(x_m, \tau) \vartheta_{pm}(t, T_p) = F$.

Начальные условия первого уравнения определяются аналогично (7.9). Для второго уравнения требуются некоторые фиксированные значения t_μ^i , полагаемые на всем интервале прогнозирования постоянными. Будем считать, что из соображений инженерного характера можно указать исходную расстановку этих моментов времени.

В соответствии с алгоритмом вместе с (7.11) в том же темпе интегрируется матричное уравнение чувствительности (7.10). Прежде чем записать это уравнение, представим уравнение (7.11) в виде

$$\varphi(x_m, \tau) \vartheta_{pm}(t, T_p) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_m, \tau) \vartheta_{pim}(t, T_p), \quad (7.12)$$

где φ_i – i -й столбец матрицы φ . Тогда уравнение для матрицы чувствительности имеет вид

$$\frac{d}{dt} Z = \left[\frac{\partial f}{\partial x_m} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \vartheta_{pim}(t, T_p) \right] Z + \varphi \frac{\partial \vartheta_{pm}}{\partial T_p}. \quad (7.13)$$

Дифференцирование функций (7.3) по любому из моментов t_μ^i как параметру дает функцию вида

$$\frac{\partial \vartheta_{pm}}{\partial t_\mu^i} = \Delta_{pm}(-1)^\mu \delta(t - t_\mu^i), \quad (7.14)$$

где $\delta(t - t_\mu^i)$ – дельта-функция. Тогда частная производная вектора ϑ_{pm} по вектору T_p представляет собой матричную функцию, у которой (7.14) определяют элемент i -й строки и μ -го столбца. Такую матрицу обозначим

$$\Delta(t, T_p) = [\Delta_{pm}] = [\Delta_{pm}(-1)^\mu \delta(t - t_\mu^i)]. \quad (7.15)$$

Следовательно, вместо (7.13) можно записать

$$\frac{d}{dt} Z = \left[\frac{\partial f}{\partial x_m} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \vartheta_{pim}(t, T_p) \right] Z + \varphi \Delta(t, T_p). \quad (7.16)$$

Обратим внимание на два обстоятельства. Во-первых, матрица Якоби $\partial F / \partial x_k$ в (7.16) в моменты скачкообразно меняет свои элементы. Это приводит к необходимости как бы "сшивать" движения различных по параметрам, но одинаковых по структуре систем. Особых мер здесь не требуется, и трудности в интегрировании не должны возникнуть. Во-вторых, в эти моменты времени t_μ^i скачкообразно изменяются некоторые элементы матрицы $Z(\tau)$. Для того чтобы учесть это изменение $Z(\tau)$ в некоторый момент t_μ^i , можно воспользоваться следующим формальным правилом. Введем матрицу $\Delta(\tau, T_p)$, элементам которой присваиваются значения Δ_p , или $-\Delta_p$, в соответствии с (7.15), если дельта-функция для данного момента времени t_μ^i не равна нулю, в противном случае элементам присваиваются нулевые значения. Произведение $\Phi \Delta(\tau, T_p)$ определит матрицу, которую следует складывать с матрицей $Z(\tau)$ в момент t_μ^i .

Полученные решения уравнений (7.11) и (7.16) используются для определения $\sum_{i=1}^n M_i$ управлений по формуле

$$u_{opt}(t) = -K \left[Z'(t_k) \frac{\partial V'(t_k)}{\partial x_k(t_k)} + \frac{\partial V'(t_k)}{\partial T_p} + \int_{t_k}^{t_k} Z'(\tau) \left(\frac{\partial Q'(\tau)}{\partial x_k(\tau)} + \frac{\partial Q'(\tau)}{\partial T_p} \right) d\tau \right] \quad (7.17)$$

Если функции V_k и Q в явном виде содержат $\mathfrak{P}_p(t)$, то дифференцирование по вектору T_p в (7.17) следует осуществлять по правилу дифференцирования сложной функции с учетом (7.14) и пояснений к уравнению (7.16). При этом наличие дельта-функций в $\partial Q / \partial T_p$ приводит к

скачкообразному изменению u_{opt} в процессе интегрирования на интервале $[t, t_k]$, а наличие дельта-функций в $\partial V_k / \partial T_p$ приводит к скачкообразному изменению компонент вектора T_p в (7.6).

Таким образом, управление объектом (7.2) с использованием релейных рулевых органов $\mathfrak{P}_p$ сводится к последовательному выполнению в каждом цикле формирования управления следующих операций.

1. По результату измерения (оценки) состояния объекта управления и его рулевых органов формируются начальные условия для (7.11) и начальные значения вектора $\mathfrak{P}_p(t, T_p) = \mathfrak{P}_{p0}$. Одновременно по априорным данным (если это первый цикл) и по результатам интегрирования второго уравнения (7.6) на предыдущем цикле (для всех последующих циклов) задаются начальные условия для вектора T_p , компонентами которого являются фиксированные моменты переключения релейного управления.

2. В ускоренном темпе моделируется движение объекта с помощью уравнений (7.11). Здесь $\mathfrak{P}_{pm}$ – моделируемая импульсная векторная функция, компоненты которой в фиксированные моменты времени из T_p претерпевают скачкообразные изменения.

3. В том же ускоренном темпе одновременно с (7.11) интегрируется матричное уравнение чувствительности (7.16) с нулевым начальным условием. Здесь $\mathfrak{P}_p$ – компоненты векторной функции $\mathfrak{P}_{pm}$; $\Delta(\tau, T_p)$ – матрица с элементами в виде дельта-функций, определяющая скачкообразные изменения в процессе интегрирования элементов матрицы $Z(\tau)$.

4. По результатам интегрирования (7.11) и (7.16) вычисляется управление (7.17), где V_k и Q – функции заданного критерия оптимальности (7.7).

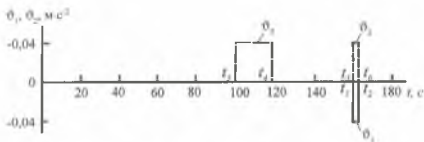


Рис. 7.2. Графики циклограмм включения двигателей

5. Сформированное управление $u_{\text{опт}}(t)$ используется как постоянное для объекта (7.6) на протяжении очередного цикла формирования управления вплоть до получения новых значений $u_{\text{опт}}(t)$. Изменение во времени компонент вектора T_p соответствует смещению моментов действия импульсных функций (7.3) в сторону отдаления $\dot{r}_\mu^i > 0$ или приближения $(\dot{r}_\mu^i < 0)$ соответствующих переключений.

6. При достижении текущим временем формирования управления t очередного момента переключения i -го рулевого органа (при приближении $t - t_\mu^i$ к нулю или к достаточно малой величине) производится действительное (а не моделируемое) переключение i -го релейного рулевого органа. Соответствующим образом меняется и значение вектора ϑ_{pm} , используемого на шаге 1 алгоритма.

Указанный алгоритм был использован для определения оптимального управления КА при сближении со станцией, имеющей стабилизированную ориентацию. В качестве примера ставилась задача из начального состояния ($x_1^0 = 200$ м; $x_2^0 = -1,55$ м с $^{-1}$; $x_3^0 = 0,0017$ с $^{-1}$; $x_4^0 = 1,8$) перевести систему за время $t_k - t_0 = 164$ с в конечное состояние ($x_1^k = 44$ м; $x_2^k = -0,3$ м с $^{-1}$; $x_3^k = 0$; $x_4^k = 0$). При этом на дальность наложено ограничение $x_1 \leq 40$ м. Функцией управления являются

циклограммы включения и выключения двигателей, выбранные произвольно, которые в соответствии с (7.3) представим в виде

$$\begin{aligned}\vartheta_1(t, t_1, t_2) &= 0 + a_x l(t - t_1) - a_x l(t - t_2), \\ \vartheta_2(t, t_3, \dots, t_6) &= 0 + a_y l(t - t_3) - a_y l(t - t_4) + \\ &+ a_y l(t - t_5) - a_y l(t - t_6).\end{aligned}\quad (7.18)$$

Графики циклограмм показаны на рис. 7.2.

Функции V_k и Q функционала в (7.7) запишем в виде

$$\begin{aligned}V_k &= \frac{\vartheta_1}{2}(x_1 - 44)^2 + \frac{\alpha_2}{2}(x_2 + 0,3)^2 + \\ &+ \frac{\alpha_3}{2}x_3^2 + \frac{\alpha_4}{2}x_4^2, \\ Q &= \frac{\beta_1}{2}(x_1 - 44)^2 + \frac{\beta_2}{2}(x_2 + 0,3)^2 + \\ &+ \frac{\beta_3}{2}x_3^2 + \frac{\beta_4}{2}x_4^2 + Q_{\text{штр}},\end{aligned}\quad (7.19)$$

$$Q_{\text{штр}} = \begin{cases} \gamma(40 - x_1) & \text{при } x < 40 \text{ м} \\ 0 & \text{при } x \geq 40 \text{ м.} \end{cases}$$

В данном примере уравнения (7.6) имеют вид

$$\begin{aligned}x_1 &= x_2, \\ x_2 &= x_1 x_3^2 + \vartheta_1, \\ x_3 &= \frac{1}{x_1}(\vartheta_2 - 2x_2 x_3), \\ x_4 &= x_3, \\ t_5 &= t_4.\end{aligned}\quad (7.20)$$

Входящие в (7.16) функции определяются соотношениями

$$\frac{\partial f}{\partial x_u} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_3^2 & 0 & 2x_1x_3 & 0 \\ 2x_2x_3 & -2x_3 & -2x_2 & 0 \\ x_1^2 & x_1 & x_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_u} g_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{a_1}{x_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\varphi \Delta(\tau, T_p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 \delta(\tau - t_1) & -a_1 \delta(\tau - t_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a_2}{x_1} \delta(\tau - t_3) & -\frac{a_2}{x_1} \delta(\tau - t_4) & -\frac{a_2}{x_1} \delta(\tau - t_5) & -\frac{a_2}{x_1} \delta(\tau - t_6) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

На основе интегрирования уравнений (7.11) и (7.16) с учетом (7.1) и (7.18) вычисляются управления по формуле (7.17), которое и определяет математическое описание ОЭИ для динамической операции сближения КА.

В результате проведения серии экспериментов и применения методов поиска экстремума функции нескольких переменных [136] были выбраны следующие значения параметров функционала:

$$\alpha_1 = 112 \text{ м}^{-2}; \quad \alpha_2 = 762 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2; \\ \beta_3 = 12600 \text{ с}^2;$$

$$\beta_4 = 1150; \quad \gamma = 170; \quad K_1 = 0,01; \quad K_2 = 0,007; \\ \alpha_3 = 350000 \text{ с}^2; \quad \alpha_4 = 4700; \quad \beta_3 = 2 \text{ м}^{-2}; \\ \beta_4 = 208 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2, \quad K_3 = 0,016; \quad K_4 = 0,01; \\ K_5 = 0,022; \quad K_6 = 0,02.$$

Результаты численного моделирования представлены на рис. 7.3 и рис. 7.4. На рис. 7.3 показана сформированная ОЭИ циклограмма включения и выключения двигателей.

На рис. 7.4 показана относительная траектория движения первого КЛА в окрестности второго КЛА, имеющего стабилизированную ориентацию.

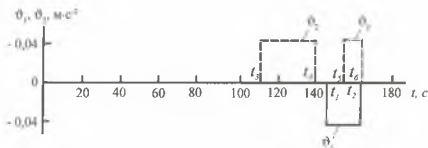


Рис. 7.3. Реализованная циклограмма включения двигателей

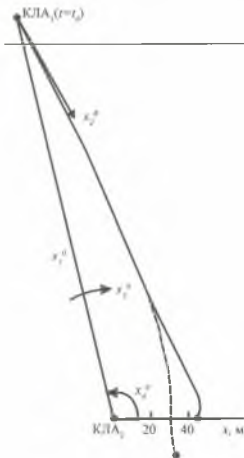


Рис. 7.4. Относительная траектория движения ПКА

Состояние, достигнутое к заданному моменту t_k , характеризуется компонентами $x_1' = 43$ м; $x_2' = -0,44$ м · с⁻¹; $x_3' = -0,0006$ с⁻¹ и $x_4 = 0,04$.

7.2. РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПИЛОТИРУЕМЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ СБЛИЖЕНИЯ

При синтезе современных систем управления динамическими объектами предусматриваются случаи возможных отказов оборудования и ошибок в управ-

лении. Для обеспечения безопасного функционирования в таких случаях используют автоматические средства ограничений с активным вмешательством в управление, которые обеспечивают наиболее высокую оперативность применяемых мер [82].

При конструировании таких средств необходимо удерживать вектор состояния объекта внутри некоторой заданной "эксплуатационной" области, выбираемой из условий достижения высокой эффективности и безопасности функционирования системы.

В работе [83] показано, что использование для оптимизации управления метода аналитического конструирования по критерию обобщенной работы обеспечивает аддитивность управлений, соответствующих различным составляющим подынтегральной функции минимизируемого функционала. Аддитивность оптимальных управлений позволяет отдельно синтезировать законы автоматов ограничений и систем управления, реализующих другие функции.

При наличии ограничений число переключений рулевых органов существенно увеличивается. Следует отметить, что при использовании алгоритма релейно-импульсного управления объектом, приведенного в п. 7.1, размерность решаемой задачи в случае увеличения числа переключений увеличивается.

Нижне приводится алгоритм, который позволяет обеспечить увеличение числа переключений рулевых органов при меньшей (относительно п. 7.1) размерности решаемой задачи.

Пусть объект управления и критерий оптимальности соответствуют выражениям (7.6) и (7.7) соответственно. Представим вектор $\mathcal{P}_p$ в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_p(t, t_1', t_2') &= \\ &= \sum_{v=1}^n [p(t - t_v) - l(t - t_{v+1})] \times \end{aligned}$$

$$\left[\vartheta_{pi0} - \Delta_{pi} \sum_{j=1}^M (-1)^j 1(t - t_{ij}^i) \right], \quad (7.21)$$

а начальные значения величин t_1^i и t_2^i подчиним условию

$$t_1^i = t_2^i = t_v. \quad (7.22)$$

Здесь L – число циклов поиска оптимального управления; v – номер этого цикла; $1(t - t_v) - 1(t - t_{v+1}) = 1(t, t_v)$ – ступенчатая единичная функция, определяющая начало и конец v -го цикла; t – текущее время.

Основное отличие формы представления компоненты ϑ_{pi} вектора ϑ_p (7.21) от (7.3) заключается в следующем. Для (7.3) число переключений t^i задается на весь интервал времени решения задачи управления КА. Это значит, что в соответствии со вторым уравнением (7.21) максимальный размер вектора управления, участвующего в вычислении в каждом i -м канале, равен числу переключений t^i . Для (7.21), вообще говоря, число t^i равно $2L$, однако наличие единичной ступенчатой функции $1(t, t_v)$ приводит к тому, что текущий момент времени t может принадлежать только одному отрезку времени, который определяет длительность v -го цикла. Таким образом, только единственная ступенчатая функция $1(t, t_v)$ может быть равна 1, а все остальные равны нулю. Поэтому в любой момент времени t при использовании (7.21) в каждом канале управления необходимо определять лишь две компоненты вектора u , так как остальные $2L - 2$ компоненты равны нулю. Следовательно, вычислительные затраты, пропорциональные размерности вектора u , будут намного меньше, чем при использовании (7.3), так

как эта размерность равна $\sum_{i=1}^M M_i$ или $2m$

при использовании (7.3) и (7.21) соответственно. Здесь M всегда заведомо больше двух. Если для (7.3) положить $M = L$, то выигрыш для (7.21) составляет величину $L/2$.

С учетом особенностей заданий вектора ϑ_p и начальных значений величин t_1^i, t_2^i , определяемых выражениями (7.21), (7.3), алгоритм управления можно представить в следующем виде.

Оптимальное управление при задании в (7.7) $V_k = 0$ определяется вычислением интеграла

$$T_p = -K \int_{t_u}^{t_k} Z^T(\tau) \frac{\partial Q^T(x_m, \tau)}{\partial x_m} d\tau. \quad (7.23)$$

Пределы интегрирования t_u и t_k соответствуют текущему моменту времени t_u , для которого оптимизируется управление, и конечному моменту t_k интервала оптимизации.

Прогнозирующая модель при условии $\vartheta_{pi0} = 0$

$$\frac{dx_m}{d\tau} = f(x_m, \tau), \quad \frac{dT_p}{d\tau} = 0 \quad (7.24)$$

с начальными условиями

$$x_m(\tau) = x(t_u). \quad (7.25)$$

Уравнение для матрицы чувствительности

$$\frac{dZ}{d\tau} = \frac{\partial f}{\partial x_m} Z + \varphi \frac{\partial \vartheta_{pm}}{\partial T_p}, \quad (7.26)$$

Рассмотрим применение алгоритма (7.21)–(7.26) к задаче ограничения состояния линейных стационарных объектов. Для обеспечения ограничений и выполнения условия $x(t) \in 0$ введем функцию штрафа вида [79]

$$Q_{\text{штр}} \begin{cases} 0 & \text{при } x(t) \in 0, \\ p_i^T x + \sigma & \text{при } x(t) \notin 0, \end{cases} \quad (7.27)$$

где p_l – n -мерный вектор достаточно больших коэффициентов, соответствующих штрафным координатам и характеризующих "строгость" границ области θ [79].

Заметим, что назначение функции штрафа (7.27) с ограниченными значениями p_l , вообще говоря, не гарантирует абсолютного выполнения условия $x \in \theta$. Можно полагать, что лишь при удачном выборе вектора p_l нарушение условия $x \in \theta$ будет кратковременным и малым в том смысле, что вектор $x(t)$ не будет покидать узкую окрестность области θ .

С учетом (7.24) и (7.27) оптимальная скорость изменения положения релейных исполнительных органов (7.22) объекта, формируемая автоматом ограничений, определится соотношением

$$T_p = -K \sum_{j=1}^N \int_{\tau_{\text{вых}}}^{\tau_j} Z^T(\tau) p_{l(j)}(\tau) d\tau, \quad (7.28)$$

где N – количество выходов прогнозируемого движения (7.27) из "эксплуатационной" области θ ; $\tau_{\text{вых}}$ и $\tau_{\text{вх}}$ – моменты j -го выхода из "эксплуатационной" области и возврата в нее, определяемые прогнозированием движения КЛА; $l(j)$ – номер нарушаемой грани области θ при j -м выходе из нее.

Для простоты будем полагать, что за период прогнозирования $[\tau_u, \tau_k]$ вектор $x_m(\tau)$ только один раз нарушает некоторую границу l и до момента окончания прогнозирования τ_k не возвращается в область θ . Тогда вместо формулы (7.28) следует использовать

$$T_p = -K \int_{\tau_{\text{вых}}}^{\tau_k} Z^T(\tau) p_l d\tau. \quad (7.29)$$

Определение управляющих сигналов (7.29) является циклическим процессом. В каждом цикле выполняются следующие операции:

1) по результату измерения состояния КЛА и на основе выражения (7.23) определяются начальные условия для (7.24) и для вектора T_p ;

2) в ускоренном темпе моделируется движение КЛА с помощью (7.24). Одновременно с (7.24) интегрируется матричное уравнение чувствительности (7.26);

3) по результатам интегрирования (7.24), (7.26) вычисляется управление и на основе второго уравнения (7.6) определяются моменты времени включения (выключения) релейного рулевого органа (вектор T_p).

Рассмотрим управление линейным стационарным объектом

$$\dot{x} = ax + b\vartheta_p(u, T_p), \quad (7.30)$$

$$T_p = u$$

при стационарной функции штрафа 7.27. В этом случае вместо 7.26 имеем

$$\frac{dZ}{dt} = aZ - b \frac{\partial \vartheta_p}{\partial T_p} \quad (7.31)$$

с нулевыми начальными условиями.

Уравнения прогнозирующей модели запишутся так:

$$\frac{dx_m}{dt} = ax_m, \quad \frac{dT_p}{dt} = 0, \quad (7.32)$$

а (7.29) примет вид

$$T_p = -K \left(\int_{\tau_{\text{вых}}}^{\tau_k} Z^T(\tau) d\tau \right) p_l. \quad (7.33)$$

Прежде чем найти решение уравнения (7.31), рассмотрим особенности дифференцирования функции ϑ_{pm} по вектору T_p . В результате дифференцирования получим

$$\frac{\partial \vartheta_{pm}}{\partial x'_\mu} = \sum_{\nu=1}^n I(\tau, t_\nu) \Delta_{p\nu} (-1)^\mu \delta(\tau - t'_\mu) \quad (\mu=1, 2), \quad (7.34)$$

где $\delta(\tau - t'_\mu)$ – дельта-функция.

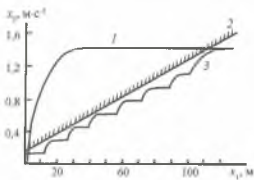


Рис. 7.6. Траектория сближения ПКА в фазовой плоскости

Частная производная вектора $\mathcal{G}_{\text{рм}}$ по вектору T_p представляет собой матричную функцию, у которой (7.34) определяет элемент i -й строки и μ -го столбца. Введем следующие обозначения:

$$\Delta(\tau, T_p) = l(\tau, t_v) \Delta_{\text{рм}}(-1)^{\mu} \delta(\tau - t_v'), \quad (7.35)$$

$$B = b \Delta(\tau, T_p).$$

Наличие δ -функций в уравнении (7.31) определяет особенность его интегрирования, которая изложена в п. 7.3. Следовательно, решение уравнения (7.31) при невырожденной матрице a будет иметь вид

$$Z(\tau) = \exp[a(\tau - \tau_u)]B, \quad (7.36)$$

где $\exp[a(\tau - \tau_u)]$ — матрица, определяемая согласно [32]; $\tau_u = t_u = t_v = T_{\text{рм}}^0$; $T_{\text{рм}}^0$ — начальные условия вектора $T_{\text{рм}}$ в пределах v -го цикла.

При сделанных ранее предположениях об условиях нарушения границ области θ оптимальная скорость изменения положения релейных исполнительных органов определяется соотношением

$$\begin{aligned} \dot{T}_p = K b^T \{ & [E - \exp[a^T(\tau_k - \tau_{\text{вых}})]] \times \\ & \times \exp[a^T(\tau_{\text{вых}} - \tau_u)] a^{-1T} \} B p_i, \end{aligned} \quad (7.37)$$

На основе второго уравнения (7.6) с учетом (7.37) можно найти значение вектора $T_{\text{рв}}$ для задачи выдерживания ограничений:

$$\begin{aligned} T_{\text{рв}} = T_{\text{рв}}^0 + K \Delta_{\text{ц}} b^T \{ & [E - \exp[a^T(\tau_k - \tau_{\text{вых}})]] \times \\ & \times \exp[a^T(\tau_{\text{вых}} - \tau_u)] a^{-1T} \} B p_i, \end{aligned} \quad (7.38)$$

где $\Delta_{\text{ц}}$ — диагональная матрица значений длительности цикла.

При известных динамических свойствах управляемого объекта (матрицы a и b), параметрах, ограничивающих эксплуатационную область θ (вектор p_i), и заданном интервале прогнозирования $[\tau_u, \tau_k]$ управляющий сигнал является функцией времени нарушения границы области θ .

Рассмотрим задачу построения ОЭИ для ограничения скорости движения КА вдоль бинормали к опорной орбите в процессе сближения с целью (рис. 7.5, см. цветную вкладку). Уравнения движения имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\omega^2 x_1 + a, \end{aligned} \quad (7.39)$$

где x_1 — координата расстояния; x_2 — координата скорости; $\omega = \text{const}$ — угловая орбитальная скорость; $a = \text{const}$ — ускорение двигателя.

Пусть в результате работы системы управления сближением сформировалась траектория сближения, которая на рис. 7.6 представлена линией 1 на фазовой плоскости x_2, x_1 .

Допустим, что "эксплуатационная" область ограничена линией 2. Рассмотрим работу ОЭИ по выдерживанию данной "эксплуатационной" области.

Возьмем функцию штрафа

$$Q_{\text{штр}} = \begin{cases} p_2(\sigma - x_2) & \text{при } x_2 \leq \sigma, \\ 0 & \text{при } x_2 > \sigma, \end{cases} \quad (7.40)$$

где $\sigma = -(0,2 + 0,01 |x_1|)$, $p_2 = 150$.

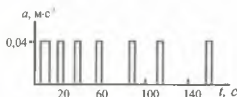


Рис. 7.7. Циклограмма включения двигателя

В соответствии с (7.21) вектор положения релейного рулевого органа (двигателя постоянной тяги) будет иметь вид

$$\Theta(t, t_1, t_2) = - \sum_{i=1}^l l(t, t_i) a \sum_{\mu=1}^2 (-1)^\mu l(t - t_\mu). \quad (7.41)$$

Оптимальная скорость изменения моментов времени t_1, t_2 включения (выключения) двигателей на основании (7.38) определится следующим выражением:

$$\begin{aligned} \dot{t}_i = & -(-1)^i \lambda_i \frac{d}{dt} [\sin(\tau_k - \tau_u) - \\ & - \sin(\tau_{\max} - \tau_u) \rho_j] \quad (i = 1, 2). \end{aligned} \quad (7.42)$$

Время прогнозирования t_k выберем из следующего условия:

$$t_k = t_u + \beta, \quad (7.43)$$

где $\beta = 10$ с.

Для определения момента времени $\tau_{\max}$, входящего в (7.42), воспользуемся соотношением

$$x_2 = \sigma.$$

На основе решения системы (7.39) и выражения для $Q_{\text{упр}}$ будем иметь

$$\begin{aligned} x_2(\tau_u) \cos \omega \tau_{\max} - \omega x_1(\tau_u) \sin \omega \tau_{\max} = \\ = -0,2 - 0,01 l(x_2(\tau_u) \sin \omega \tau_{\max} / \omega + x_1 \cos \omega \tau_{\max}). \end{aligned} \quad (7.44)$$

Решение трансцендентного уравнения (7.44) позволяет определить $\tau_{\max}$. В соответствии с (7.38) компоненты вектора

T_{pv} в каждом цикле поиска управления будут иметь значения

$$t_{v1} = t_{v1}^0 + \dot{t}_1 \Delta t_{\text{ц}}, \quad t_{v2} = t_{v2}^0 + \dot{t}_2 \Delta t_{\text{ц}}. \quad (7.45)$$

В результате построения ОЗИ при решении задачи ограничения скорости движения КА сформировалась циклограмма включения двигателя, которая представлена на рис. 7.7.

Этой циклограмме соответствует фазовая траектория, изображенная линией 3 на рис. 7.6. Следовательно, ОЗИ обеспечивает прохождение фазовой траектории в пределах "эксплуатационной" области.

Теперь рассмотрим управление нестационарным линейным объектом

$$\ddot{x} = a(t)x + b(t)\Theta_p(t, T_p), \quad T_p = u. \quad (7.46)$$

В этом случае уравнение (7.26) примет вид

$$\frac{dZ}{dt} = a(\tau)Z + b(\tau) \frac{\partial \Theta_p(\tau, T_p)}{\partial T_p}. \quad (7.47)$$

Функцию $\Theta_p(\tau, T_p)$ будем полагать прежней (7.21). По аналогии с (7.34)–(7.36) и в соответствии с [32] решение уравнения (7.47) будет иметь вид

$$Z(\tau) = W(\tau, \tau_s) B(\tau), \quad (7.48)$$

где $B(\tau) = b(\tau) \Delta(\tau, T_p)$; $W(\tau, \tau_s)$ – матрица Коши, определяемая при $\tau \geq \lambda$ как решение уравнения

$$\frac{d}{dt} W(\tau, \lambda) = a(\tau)W(\tau, \lambda), \quad W(\lambda, \lambda) = I, \quad (7.49)$$

где I – единичная матрица.

Тогда оптимальная скорость изменения положения релейных исполнительных органов определяется соотношением

$$T_p = -K \left\{ \int_{\tau_s}^{\tau} [W(\tau, \tau_s) B(\tau)]^T d\tau \right\} p_l. \quad (7.50)$$

Аналитическое определение решения (7.50) затруднительно. Поэтому возможны два варианта построения алгоритма. Первый основан на численном решении уравнений (7.49), (7.50), требует больших вычислительных затрат и здесь не рассматривается. Второй вариант использует приближенное решение уравнения (7.47) в виде степенного ряда. В общем случае для объекта (7.6) на основании [79] имеем

$$\begin{aligned} X[x(t_u), t_u, t_k, \Theta_p] = & x(t_u) + \frac{t_k - t_u}{1!} F + \\ & + \frac{(t_k - t_u)^2}{2!} \frac{\partial F}{\partial x} F + \frac{(t_k - t_u)^3}{3!} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial x} F \right) + \dots \end{aligned} \quad (7.51)$$

где $x(t_u)$ – вектор начальных условий;
 t_k – время прогноза; t_u – начальное время;

$$F = f(x, t_u) + \varphi(x, t_u) \Theta_p(t_u, T_p).$$

Применительно к (7.47) выражение (7.51) запишется так:

$$\begin{aligned} Z^0[z^0(\tau_u), \tau_u, \tau_k] = & z^0(\tau_u) + \frac{\tau_k - \tau_u}{1!} \times \\ & \times a(\tau_u) z^0(\tau_u) + \frac{(\tau_k - \tau_u)^2}{2!} a(\tau_u) \times \\ & \times \frac{\partial Z}{\partial z} a(\tau_u) z^0(\tau_u) + \frac{(\tau_k - \tau_u)^3}{3!} a(\tau_u) \frac{\partial Z}{\partial z} \times \\ & \times a(\tau_u) \frac{\partial Z}{\partial z} a(\tau_u) z^0(\tau_u) + \dots \end{aligned} \quad (7.52)$$

где $z^0(\tau_u) = B(\tau_u)$.

Тогда выражение (7.51) примет вид

$$T_p = K \left[\int_{t_u}^{t_k} Z^0(z^0, \tau) d\tau \right] p_l. \quad (7.53)$$

Аналогично для нелинейного КА вида (7.6) с функцией штрафа (7.40) возможны два варианта алгоритма синтеза автоматов ограничений. Первый из них основан на численном интегрировании уравнений (7.24), (7.26), второй – на при-

ближенном решении уравнения (7.24) с использованием степенных рядов. При этом (7.26) приводится к виду

$$\frac{dZ}{dt} = D(\tau)Z + C(\tau) \frac{\partial \Theta_p(\tau, T_p)}{\partial T_p},$$

где матрицы $D(\tau)$ и $C(\tau)$ получаются после дифференцирования функции f , входящей в (7.26), и подстановки в эти выражения значений приближенного решения уравнения (7.24). Таким образом, для нелинейного КА данный вариант алгоритма аналогичен выражениям (7.52), (7.53) нестационарного линейного КА.

Пусть КА как объект управления описывается следующими нелинейными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_1 x_3^2 + a_x, \\ \dot{x}_3 &= (a_y - 2x_2 x_3) / x_1, \\ \dot{x}_4 &= x_3, \end{aligned} \quad (7.54)$$

где x_1 – дальность; x_2 – продольная скорость сближения; x_3 – угловая скорость линии визирования; x_4 – угол между продольными осями КА и цели; a_x, a_y – ускорения, создаваемые двигателями КА соответственно вдоль и поперек линии визирования (7.1).

Предположим, что в результате работы системы управления сближением угловая скорость линии визирования изменяется в зависимости от времени полета по графику, представленному на рис. 7.8, а начальные условия в момент времени $t_0 = 150$ с имели значения

$x_1^0 = 156$ м, $x_2^0 = -1,3$ м·с⁻¹, $x_3^0 = -0,012$ с⁻¹, $x_4^0 = 2,4$ рад. Спроектируем ОЭИ для задачи синтеза по управлению угловой скоростью линии визирования, которая не должна превышать $|x_3| \leq 0,016$ с⁻¹.

Поскольку объект (7.54) является нелинейным, то воспользуемся алгоритмом синтеза ОЭИ, основанном на приближен-

ном решении уравнений (7.54). В соответствии с (7.51) это решение имеет вид

$$\begin{aligned}x_1 &= x_1^0 + x_2^0 t + 0,5 x_1^0 x_3^0 t^2 - 0,5 x_1^0 t^3 x_2^0 + 0,5 a_x t^2 + \frac{1}{6} a_x t^3 + \frac{1}{3} a_y x_3^0 t^3, \\x_2 &= x_2^0 + x_1^0 x_3^0 t - 1,5 x_3^0 x_2^0 t^2 + a_x t + 0,5 a_x t^2 + a_y x_3^0 t^2, \\x_3 &= x_3^0 - 2 x_2^0 x_3^0 t / x_1^0 + 3 x_2^0 t^2 / x_1^0 - x_3^0 t^2 + a_y t / x_1^0 - 1,5 a_y x_2^0 t^2 / x_1^0 - a_x x_3^0 t^2 / x_1^0, \\x_4 &= x_4^0 + x_3^0 t + x_2^0 x_3^0 t^3 / x_1^0 - x_2^0 x_1^0 t^2 / x_1^0 - \frac{1}{3} x_3^0 t^3 + 0,5 a_y t^2 / x_1^0 - \\&\quad - 0,5 a_y x_2^0 t^3 / x_1^0 - \frac{1}{3} x_3^0 t^3 / x_1^0.\end{aligned}\quad (7.55)$$

Функцией управления являются циклограммы включения и выключения двигателей, которые в соответствии с (7.41) представим так:

$$\begin{aligned}\vartheta_1 &= \sum_{i=1}^k l(t, t_v) [-a_x l(t - t_1) + a_x l(t - t_2)], \\ \vartheta_2 &= \sum_{i=1}^l l(t, t_v) [-a_y l(t - t_3) + a_y l(t - t_4)].\end{aligned}\quad (7.56)$$

Время прогнозирования t_k выберем из условия

$$t_k = t_k^* + \beta_1,$$

где $\beta_1 = 20$ с. В силу малости времени прогноза при поиске решения уравнения (7.52) ограничимся первыми двумя членами разложения. В соответствии с (7.56) решение (7.52) запишется так:

$$\begin{aligned}Z^T &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_x & a_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_y & a_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_3^2 & 0 & 2x_1 x_3 & 0 \\ 2x_2 x_3 / x_1^2 & -2x_3 / x_1 & -2x_2 / x_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_x & a_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_y & a_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_x t & a_x t & 0 & 0 \\ -a_x & a_x & -2x_1 x_3 a_y t & 2x_1 x_3 a_y t \\ 2x_3 a_x t / x_1 & -2x_3 a_x t / x_1 & 2x_2 a_y / x_1 - a_y & a_y - 2x_2 a_y / x_1 \\ 0 & 0 & -a_y t & a_y t \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (7.57)$$

Вектор p_i имеет вид

$$p_i = [0 \ 0 \ \gamma \ 0]^T, \quad (7.58)$$

где $\gamma = 200$.

На основе выражения (7.53) с учетом (7.58) оптимальная скорость изменения положения релейных исполнительных

органов определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}i_1 &= - \int \gamma 2x_3 a_x t / x_1 dt, \quad i_2 = -i_1, \\ i_3 &= - \int \gamma (2x_2 a_y t / x_1 - a_y) dt, \quad i_4 = -i_3.\end{aligned}\quad (7.59)$$

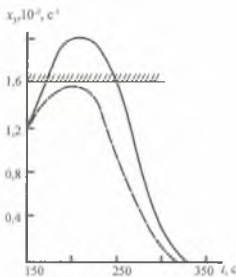


Рис. 7.8. График изменения угловой скорости линии визирования

Время $\tau_{\text{вых}}$ находится из условия

$$-0,016 = x_3^0 - 2x_2^0 x_3^0 \tau_{\text{вых}} / x_1^0 + (3x_2^0 x_1^0 - x_3^0) \tau_{\text{вых}}^2. \quad (7.60)$$

В результате решения задачи синтеза автомат ограничения сформировал циклограмму включения двух двигателей вдоль осей X и Y , которая представлена на рис. 7.9.

При этом график изменения угловой скорости линии визирования представлен на рис. 7.8 штриховой линией. Анализируя представленные на рис. 7.8 графики, можно сделать вывод, что ОЗИ строго выдержал наложенное ограничение по угловой скорости линии визирования.

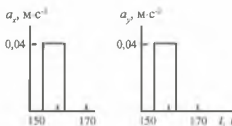


Рис. 7.9. Циклограмма включения двигателей вдоль осей X и Y

7.3. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СБЛИЖЕНИЕМ ПКА ВДОЛЬ БИНОРМАЛИ К ОПОРНОЙ ОРБИТЕ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА РАСХОДА ТОПЛИВА

Существует целый класс задач релейного управления, для которых любые маневры должны осуществляться с минимальными расходами топлива. Известен классический метод решения задачи оптимального релейного управления расходом топлива с использованием принципа максимума Понтрягина [139]. Решение задачи синтеза в данном случае сводится к решению краевой задачи, которая для многомерных нелинейных объектов представляет большие трудности. В работе [121] показано, что при размерности пространства состояния, равной десяти, вычислительные трудозатраты определяются десятками или даже сотнями миллиардов операций в секунду, что недостижимо в обозримом будущем.

Поэтому для решения задачи определения оптимального релейного управления расходом топлива предлагается метод, основанный на совмещении достояния принципа максимума Понтрягина, используемого только для определения числа переключений релейного управления, и алгоритма релейного управления с прогнозирующей моделью, рассмотренного в п. 7.1. В этом случае отпадает необходимость решения краевой задачи, что приводит к значительному снижению потребного быстродействия компьютера и открывает перспективы его реализации на компьютерах ограниченной производительности.

Пусть объект описывается векторным уравнением

$$\dot{x} = f(x, t) + \varphi(x, t)u, \quad (7.61)$$

где $x \in R^n$, $u \in R^m$, $t \in [t_0, t_k]$. Предполагается, что объект (7.61) управляем. Огра-

ничения на управление $u(t) \in U$ записываются в виде

$$|u_j| \leq u_{j\max}, j = \overline{1, m}.$$

Требуется определить оптимальное управление $u_{\text{опт}}(t)$, переводящее объект (7.61) из фиксированного начального состояния $x(t_0) = x^0$ в фиксированное конечное состояние $x(t_k) = x^k$ за заданное время $t_k - t_0 > T$ (где T – минимально возможное время) таким образом, чтобы функционал

$$I = \sum_{t_0}^{t_k} |u_j(t)| dt = \int_{t_0}^{t_k} u^T(t) \text{sign } u(t) dt = W \quad (7.62)$$

(где $\text{sign } u = [\text{sign } u_1, \dots, \text{sign } u_m]^T$, W – расход топлива), принимал минимальное значение.

Гамильтониан в данной задаче записывается в виде

$$H(x, u, t) = \psi_0 u^T \text{sign } u + \psi^T f(x, t) + \psi^T \Phi(x, t) u, \quad (7.63)$$

где ψ – n -мерный вектор вспомогательных переменных, ψ и ψ_0 удовлетворяют уравнениям

$$\dot{\psi} = - \left[\frac{\partial f^T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\Phi u)^T \right] \psi, \quad \psi_0 = 0. \quad (7.64)$$

Для релейного управления с минимизируемым функционалом (7.62) закон оптимального управления определяется из условия максимума выражения

$$\max_{u \in U} (\psi_0 u^T \text{sign } u + \psi^T \Phi(x, t) u). \quad (7.65)$$

Тогда соотношение для оптимального релейного управления с учетом того, что $\psi_0 = -1$, будет иметь вид

$$u_{j\text{опт}} = \begin{cases} 0 & \text{при } \left| \sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu,j} \right| \leq 1, \\ u_{j\max} \text{sign} \left(\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu,j} \right) & \text{при } \left| \sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu,j} \right| > 1. \end{cases} \quad (7.66)$$

В дальнейшем будем полагать, что оптимальное управление, определяемое выражением (7.66), существует.

Приведем задачу оптимального релейного управления расходом топлива с применением принципа максимума Понтрягина к виду, позволяющему использовать алгоритм релейного управления с прогнозирующей моделью (п. 7.1), и установим связь классического функционала минимума расхода топлива с неклассическим функционалом обобщенной работы (ФОР), на базе которого строится алгоритм релейного управления.

Управление, определяемое выражением (7.66), являясь кусочно-непрерывным (даже кусочно-постоянным). По определению кусочно-непрерывной функции [111] управление $u_{\text{опт}}(t)$ будет непрерывно во всех точках $t \in [t_0, t_k]$ за исключением, быть может, лишь конечного числа точек $t_{11}^1, \dots, t_{1k}^1 \in [t_0, t_k]$, $t_{21}^2, \dots, t_{2k}^2 \in [t_{11}^1, t_k]$, в которых функция $u_{\text{опт}}(t)$ может терпеть разрывы типа скачка [111]. Следовательно, условие (7.66) оптимального переключения релейного управления можно записать так:

$$u_j = u_{j\text{от}} = u_{j\text{max}} \operatorname{sign} \left[\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right] \times \\ \times \left[\sum_{k=1}^{l_j} [H(t - t_{1k}^j) - H(t - t_{2k}^j)] \right], \quad (7.67)$$

где l_j – число переключений релейного управления за заданный интервал оптимизации $[t_0, t_k]$, определяемое неравенством $\left| \sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right| > 1$, t_{1k}^j, t_{2k}^j – моменты включения (t_{1k}^j) и выключения (t_{2k}^j) релейного рулевого органа, причем $t_{1k}^j \leq t_{2k}^j$; $H(b_n)$ – функция Хевисайда ($n = 1, 2$); $b_1 = t - t_{1k}^j$; $b_2 = t - t_{2k}^j$;

$$H(b_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } b_n > 0, \\ 0, & \text{если } b_n \leq 0. \end{cases} \quad (7.68)$$

В результате решения задачи с использованием принципа максимума определяются параметры l_j, t_{1k}^j, t_{2k}^j , а также

$$\text{функция } \operatorname{sign} \left[\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j}(x, t) \right].$$

С учетом (7.67) уравнение объекта (7.61) и функционал (7.62) запишем следующим образом:

$$\dot{x}_i = f_i(x, t) + \sum_{j=1}^m \Phi_{ij}(x, t) u_{j\text{max}} \operatorname{sign} \left[\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right] \times \\ \times \left[\sum_{k=1}^{l_j} [H(t - t_{1k}^j) - H(t - t_{2k}^j)] \right], \quad i = \overline{1, n}, \quad (7.69)$$

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{j=1}^m |u_{j\text{max}} \operatorname{sign} \left[\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right] \times \\ \times \left[\sum_{k=1}^{l_j} [H(t - t_{1k}^j) - H(t - t_{2k}^j)] \right]| dt. \quad (7.70)$$

Следует отметить, что число переключений l_j может быть различным в зависимости от начальных условий $x^0 \in X^0$ и интервала оптимизации $[t_0, t_k]$.

Рассмотрим (7.69) как модель движения объекта с релейными рулевыми органами, положение которых характеризует функция

$$\Theta_{0j} = u_{j\text{max}} \operatorname{sign} \left[\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right] \times \\ \times \left[\sum_{k=1}^{l_j} [H(t - t_{1k}^j) - H(t - t_{2k}^j)] \right], \quad (7.71)$$

и поступим следующим образом. С использованием принципа максимума определим на основе исследования неравенства

$$\left| \sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right| > 1 \quad (7.72)$$

только максимально возможные числа переключений l_j релейного рулевого органа, которые обозначим $l_{j\text{max}}$, а в качестве компонент управления возьмем моменты времени t_{1k}^j и t_{2k}^j , подчиненные уравнениям

$$t_{1k}^j = u_{j1k}^*, \quad t_{2k}^j = u_{j2k}^*. \quad (7.73)$$

Тогда роль знаковой функции $\operatorname{sign} \left[\sum_{\mu=1}^n \psi_{\mu} \Phi_{\mu j} \right]$ в (7.71) будет играть выражение $[H(t - t_{1k}^j) - H(t - t_{2k}^j)]$, поскольку в этом случае моменты времени t_{1k}^j и t_{2k}^j не будут подчинены условию $t_{1k}^j \leq t_{2k}^j$, как это имело место в (7.71), (7.73). Следовательно, тогда функция Θ_{0j} , определяемая соотношением (7.71), запишется так:

$$\vartheta_{pi} = u_{jmax} \left\{ \sum_{k=1}^i [H(t - t'_{ik}) - H(t - t''_{ik})] \right\}, \quad (7.74)$$

а уравнение объекта (7.61) примет вид

$$\dot{x} = f(x, t) + \varphi(x, t) \vartheta_p(t, T_p), \quad \dot{T}_p = u^*, \quad (7.75)$$

где T_p – вектор, компонентами которого являются t'_{ik} и t''_{ik} , u^* – вектор новых управлений, включающий u^*_{jik} и u^*_{j2k} .

Таким образом, если решать задачу синтеза оптимального управления, обеспечивающего минимум расхода топлива, с использованием принципа максимума, то для объекта с релейными рулевыми органами вида (7.61) возможен переход к управлению объектом вида (7.75). Это позволяет для дальнейшего решения задачи синтеза управления объектом (7.4) использовать предложенный в п. 7.1 алгоритм релейного управления с прогнозирующей моделью, минимизирующий функционал обобщенной работы.

Алгоритм релейного управления обеспечивает минимум квадратичного функционала

$$I_{K_p} = V_{зд} (x(t_k), t_k) + \int_{t_0}^{t_k} Q(x(\tau), \tau) d\tau + 0,5 \int_{t_0}^{t_k} (u^{*T} K^{-1} u^* + u_{\text{опт}}^{*T} K^{-1} u_{\text{опт}}^*) dt, \quad (7.76)$$

где $V_{зд}$ и Q – заданные положительно определенные функции; K – диагональная матрица положительных коэффициентов; $u_{\text{опт}}^*$ – вектор пока еще неизвестных оптимальных сигналов управления.

Для объекта (7.75) с функционалом (7.76) задача ставится как задача минимизации функционала, "штрафующего" за ошибки вывода, а не как задача абсолютного точного выполнения граничного усло-

вия на правом конце, как это имело место для объекта (7.61) с функционалом (7.62). В этой связи рассматривается переход объекта (7.75) из заданного начального состояния x^0 в пространстве x в окрестность заданного состояния x^k в момент времени t_k . За выход в эту окрестность будет отвечать терминальная часть функционала $V_{зд}$, которую запишем так:

$$V_{зд} [x(T_p, t_k)] = 0,5 [x(T_p, t_k) - x^k]^T \alpha [x(T_p, t_k) - x^k], \quad (7.77)$$

где α – диагональная матрица задаваемых параметров.

При условии $x(T_p, t_k) = x^k$, $V_{зд} = 0$ это будет соответствовать точному выполнению граничного условия для объекта (7.75). На практике при управлении динамическими объектами точное выполнение требования $x(T_p, t_k) = x^k$ невозможно хотя бы из-за ошибок наблюдения, поэтому при решении задачи синтеза управления лишь с определенной точностью можно обеспечить условие $V_{зд} [x(T_p, t_k)] = 0$.

Функцию Q функционала (7.76) представим так:

$$Q = \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^m u_{jmax} \text{sign}(t'_{2k} - t'_{1k}) \times [H(t - t'_{1k}) - H(t - t'_{2k})], \quad (7.78)$$

где знаковая функция $\text{sign}(t'_{2k} - t'_{1k})$ обеспечивает положительность Q . Следовательно, функция Q эквивалентна подынтегральной части функционала (7.70) и характеризует расход топлива. Отсюда можно записать

$$\int_{t_0}^{t_k} Q dt = W. \quad (7.79)$$

В соответствии с выражениями (7.78) и (7.79) для функционала (7.76) будем иметь

$$\min I_{Kp}^* = V_{\text{зад}}[x(T_p, t_k)] + \int Q dt, \quad (7.80)$$

где I_{Kp}^* – главная часть функционала (7.76).

В предположении выполнения тождества $V_{\text{зад}}[x(T_p, t_k)] = 0$ и с учетом (7.79) равенство (7.80) запишется так:

$$\min I_{Kp}^* = W. \quad (7.81)$$

Соответственно, для функционала (7.62) с учетом (7.70) будем иметь

$$\min I = \min I = \left| \sum_{j=1}^n u_{j\max} \text{sign} \left[\sum_{i=1}^n \psi_i \Phi_{ij} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[\sum_{k=1}^{l_j} |H(t - t_{ik}') - H(t - t_{ik}'')| \right] \right| dt = W. \quad (7.82)$$

На основании (7.81) и (7.82) получим

$$\min I = \min I_{Kp}^* \quad (7.83)$$

при условии $V_{\text{зад}}[x(T_p, t_k)] = 0$. Следовательно, равенство (7.83) будет в конечном итоге определять связь классического функционала минимума расхода топлива с ФОР.

Заметим, что степень точности достижения условия $V_{\text{зад}}[x(T_p, t_k)] = 0$ выражает не только пределы приближенности равенства (7.83), она также определяет и степень совпадения решения задачи оптимального релейного управления расходом топлива с использованием принципа максимума Понтрягина и предлагаемого в данной работе метода решения этой же задачи.

Рассмотрим решение задачи управления сближением КА вдоль бинормали к

опорной орбите. В этом случае уравнение движения будет иметь вид

$$\ddot{\xi} + \omega^2 \xi = f_{\xi}(t), \quad (7.84)$$

где f_{ξ} – ускорение тяги двигателя по бинормали (см. рис. 7.5). Введя безразмерный параметр $\tau = \omega t$, преобразуем уравнение (7.86) к виду

$$\ddot{\xi} + \xi = \frac{1}{\omega^2} f_{\xi}(\tau). \quad (7.85)$$

Воспользуемся полученным в работе [81] решением задачи оптимального управления с использованием принципа максимума Понтрягина, которое соответствует минимуму расхода топлива, выражаемому величиной характеристической скорости

$$I(f_{\xi}) = W_{\xi} = \frac{1}{\omega} \int_0^{\tau_0} f_{\xi}(\tau) |d\tau, \quad (7.86)$$

где $\tau = \omega T$, T – время сближения.

Для данного примера выражение (7.63) будет иметь вид

$$H = \psi^T \left(-A \xi(\tau) + \frac{1}{\omega^2} B f_{\xi}(\tau) \right) - \psi_0 \frac{1}{\omega} |f_{\xi}(\tau)|, \quad (7.87)$$

где

$$\xi(\tau) = \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}.$$

а компоненты вектора ψ с учетом (7.64) определяются из решения системы уравнений

$$\dot{\psi} = A\psi. \quad (7.88)$$

На основании выражений (7.66), (7.68) оптимальное управление имеет вид

$$f_{\xi}(\tau) = u_{\text{опт}} = \begin{cases} m \text{sign } \psi_2, & \text{если } |\psi_2| > 1, \\ 0, & \text{если } |\psi_2| \leq 1, \end{cases} \quad (7.89)$$

где $m = \text{const}$ – ускорение, определяемое тягой двигателя.

Неравенство (7.72) в условиях данного примера с учетом решения уравнения (7.88) будет иметь вид

$$\psi_2 = C \sin(\tau + \phi) > 1, \quad (7.90)$$

где C и ϕ – постоянные величины, которые выбираются так, чтобы обеспечивалось выполнение граничных условий.

Пусть задача ставится так: из начального состояния $\xi_1^0 = 200$ м, $\xi_2^0 = -2,0$ м $\cdot$ с $^{-1}$ систему требуется перевести за время $[t_0, t_k] = [0, 124,8]$ с в конечное состояние ($\xi_1^k = \xi_2^k = 0$). Поскольку $\tau = 0,1248 < \pi/2$, то на основании исследования неравенства (7.90) можно сделать вывод, что максимально возможное число переключений для заданного интервала оптимизации $[0; 124,8]$ равно двум ($l_{\max} = 2$). Тогда вектор положения рулевых органов будет

иметь вид

$$\vartheta_p = m[H(t - T_{11}) - H(t - T_{21}) + H(t - T_{12}) - H(t - T_{22})]. \quad (7.91)$$

Функции $V_{\text{эл}}$ и Q функционала (7.76) запишем в виде

$$V_{\text{эл}} = \frac{\alpha_1}{2} \xi_1^2 + \frac{\alpha_2}{2} \xi_2^2, \quad (7.92)$$

$$Q = \sum_{i=1}^2 m[H(t - T_{11}) - H(t - T_{21}) + H(t - T_{12}) - H(t - T_{22})]. \quad (7.93)$$

Уравнения прогнозирующей модели (7.11) запишутся так:

$$\xi_1' = \xi_2, \quad \xi_2' = \vartheta_p - \omega^2 \xi_1. \quad (7.94)$$

Входящие в (7.13) функции определяются соотношениями

$$\frac{\partial}{\partial x_m} = A, \quad \Phi \frac{\partial \vartheta_{pm}}{\partial T_p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ m\delta(\tau - T_{21}) & m\delta(\tau - T_{22}) & -m\delta(\tau - T_{11}) & -m\delta(\tau - T_{12}) \end{bmatrix}, \quad (7.95)$$

где $\delta(\tau - T_{ji})$ – дельта-функция.

На основе интегрирования (7.94) и (7.13) с учетом (7.95) вычисляются управления по формуле (7.17). В работе [68] приведены аналитические выражения определения данного оптимального управления.

В результате проведения серии экспериментов были выбраны следующие значения параметров функционала: $\alpha_1 = 6$ м 2 ; $\alpha_2 = 4000$ м $^2 \cdot$ с 2 ; $K_1 = K_2 = 124,8 \cdot 10^{-4}$ (127 – 77); $K_3 = K_4 = 0,01$. Начальные условия вектора T_p имели следующие значения: $T_{11} = T_{21} = 12,5$ с, $T_{22} = T_{12} = 100,7$ с и выбирались на основе качественного анализа неравенства (7.90), который говорит о том, что первое включение двигателя должно быть в начале движения, а второе

включение в конце. Длительность $\Delta t_{\text{в}}$ поиска оптимального управления была принята равной 1,5 с. В результате численного моделирования сформированная алгоритмом управления и реализованная циклограмма включения и выключения двигателя (вектор положения рулевых органов) имела вид

$$\vartheta_p = f_{\xi} = -0,04[H(t - 13,0) - H(t - 12,6) + H(t - 124,8) - H(t - 75,2)], \quad (7.96)$$

а значение расхода характеристической скорости $-W_1 = 2,04$ м $\cdot$ с $^{-1}$. Состояние, достигнутое к заданному моменту $t_k = 124,8$ с, характеризуется компонентами $\xi_1^k = 0,08$ м, $\xi_2^k = 0,006$ м $\cdot$ с $^{-1}$.

Для этих же начальных условий ($\xi_1^0 = 200 \text{ м}$, $\xi_2^0 = -2,0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) в соответствии с работой [85] циклограмма включения и выключения двигателя при поиске решения с использованием принципа максимума Понтрягина имеет вид

$$\mathcal{U}^{\text{оп}} = \mathcal{U}^{\text{пм}} = -0,04[H(t-124,8) - H(t-74,8)], \quad (7.97)$$

а $W = -2,08 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. При этом $\xi_1^* = \xi_2^* = 0$.

В заключение отметим, что для класса задач релейного управления, оптимальных по расходу топлива, можно получить практически совпадающие решения как с использованием принципа максимума, так и предлагаемого алгоритма. Использование принципа максимума в разработанном алгоритме только для определения числа переключений релейного управления и алгоритма релейного управления с прогнозирующей моделью позволяет избежать решения краевой задачи.

7.4. РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ОБЛЕТА ПКА В ПЛОСКОСТИ ОРБИТЫ

Рассмотрим задачу выполнения облета КА, который осуществляется обычно в процессе сближения и стыковки космических аппаратов. Считаем, что плоскость облета построена и стабилизируется. Предположим, что влиянием гравитационного поля на относительное движение КА можно пренебречь. Тогда относительное движение в плоскости облета описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_1 x_3^2 + a_x, \\ \dot{x}_3 &= (a_y - 2x_2 x_3) / x_1, \\ \dot{x}_4 &= x_3, \end{aligned} \quad (7.98)$$

где x_1 – дальность; x_2 – продольная скорость сближения; x_3 – угловая скорость линии визирования; x_4 – угол облета, от-

считываемый в плоскости облета между продольными осями КА; a_x и a_y – ускорения, создаваемые двигателями первого КА соответственно вдоль и поперек линии визирования (см. рис. 7.1).

Необходимо перевести систему из начального состояния ($x_1^0 = 295 \text{ м}$, $x_2^0 = -1,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $x_3^0 = -0,0017 \text{ с}^{-1}$, $x_4^0 = 1,84$) за время $t_k - t_0 = 270 \text{ с}$ в конечное состояние ($x_1^k = 110 \text{ м}$, $x_2^k = -0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $x_3^k = 0$, $x_4^k = 0$) при $x_1 \geq d$, $|x_3| \leq b$. Величины d и b характеризуют границы "эксплуатационных" областей по параметрам x_1 и x_3 соответственно.

Вектор релейно-импульсных управляющих воздействий будем рассматривать как сумму некоторого последовательного набора включений неизвестной длительности. Тогда уравнение управляемого объекта в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + f(x, t) &= \Phi(x, t) \Delta_p \times \\ &\times \sum_{v=1}^M [l(t - t_v) - l(t - t_{v+1})] (u_v^* \text{sign } u_v) \text{sign } u_v. \end{aligned} \quad (7.99)$$

Здесь Δ_p – диагональная матрица приращений скачкообразных изменений положения исполнительных органов; $l(t - t_v) - l(t - t_{v+1}) = l(t, t_v)$, $l(t_v^*, \text{sign } u_v)$ – диагональные матрицы единичных ступенчатых функций, u_v – вектор релейных управлений, который определяет длительность и полярность включения релейного рулевого органа и удовлетворяет условию $u_v = l(u_v^* \text{sign } u_v, \text{sign } u_v; \text{sign } u_v = [\text{sign } u_{v1}, \dots, \text{sign } u_{vm}]^T$; M – число включений релейных исполнительных органов, v – номер включения, t_v, t_{v+1} – фиксированные моменты времени.

Сформулируем и решим задачу оптимального релейно-импульсного управ-

ления для объекта, описываемого уравнением (7.99). В силу того, что

$$u_v = I(u_v^T \operatorname{sign} u_v) \operatorname{sign} u_v, \quad (7.100)$$

уравнение (7.99) имеет вид

$$\dot{x} + f(x, t) = \varphi(x, t) \Delta_p \sum_{v=1}^M l(t, t_v) u_v. \quad (7.101)$$

Для объекта (7.101) оптимальное [в смысле минимума функционала (7.7)] управление из незамкнутого множества U определится соотношением

$$u_{v \text{ опт}} = -l(t, t_v) K \Delta_p \Phi^T \frac{\partial V^T}{\partial x}. \quad (7.102)$$

Доказательство оптимальности (7.102) сводится к следующему. Полная производная по времени искомой функции $V(x, t)$ с учетом (7.101) может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} V(x, t) &= \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial V(x, t)}{\partial x(t)} f(t) + \\ &+ \frac{\partial V(x, t)}{\partial x(t)} \varphi(x, t) \Delta_p \sum_{v=1}^M l(t, t_v) u_v. \end{aligned} \quad (7.103)$$

Используя (7.102), имеем

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, t) &= \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial V(x, t)}{\partial x(t)} f(t) - \\ &- \sum_{v=1}^M u_{v \text{ опт}}^T K^{-1} u_v. \end{aligned} \quad (7.104)$$

Если функция $V(x, t)$ удовлетворяет уравнению (6.12), то

$$\dot{V} = -Q(t) - \sum_{v=1}^M u_{v \text{ опт}}^T K^{-1} u_v.$$

Интегрируя по t , получим

$$\begin{aligned} V(x, t) - V(x_0, t_0) &= \\ &= - \int_{t_0}^t Q(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t u_{v \text{ опт}}^T K^{-1} u_v d\tau. \end{aligned} \quad (7.105)$$

Воспользовавшись (7.105) и граничным условием $V(t_k) = V_{\text{зад}}(x(t_k))$, можно записать выражение для минимизируемого функционала

$$\begin{aligned} I = V(x_0, t_0) + 0.5 \int_{t_0}^{t_k} \sum_{v=1}^M u_v^T K^{-1} u_v + \\ + \sum_{v=1}^M u_{v \text{ опт}}^T K^{-1} u_{v \text{ опт}} \Big] dt - \int_{t_0}^{t_k} \sum_{v=1}^M u_{v \text{ опт}}^T K^{-1} u_v dt. \end{aligned} \quad (7.106)$$

Окончательно имеем

$$\begin{aligned} I = V(x_0, t_0) + \\ + 0.5 \int_{t_0}^{t_k} \left[\sum_{v=1}^M (u_v - u_{v \text{ опт}})^T K^{-1} (u_v - u_{v \text{ опт}}) \right] dt. \end{aligned} \quad (7.107)$$

Так как функция $V(x_0, t_0)$ не зависит от управления на интервале $[t_0, t_k]$, то функционал (7.107) достигает минимума при $u_v = u_{v \text{ опт}}$, что и требовалось доказать.

Таким образом, реализация алгоритма управления объектом (7.98) сводится к вычислению $U(x, t)$ с соответствующим граничным условием. Из (7.103), (7.105) следует, что полная производная функции V определяется соотношением

$$\dot{V} = -Q(x, t), \quad (7.108)$$

если $Q(x, t)$ вычисляется при $u_v = 0$. Зная граничное значение $V(x, t_k) = V_{\text{зад}}$ и проинтегрировав (7.108), определим ее значение

$$V(x(t), t) = V_{\text{зад}}(x(t_k), t_k) + \int_{t_k}^t Q(x, \tau) d\tau. \quad (7.109)$$

При этом вычисления должны осуществляться при прогнозируемых на отрезке $[t, t_k]$ состояниях процесса

$$\dot{x} + f(x, t) = 0 \quad (7.110)$$

с начальным условием, определяемым текущим состоянием объекта управления.

Пусть существует полное решение уравнения (7.101) при произвольных начальных условиях $x(t_0)$:

$$X[x(t_0), t, t_0] = X(x, t, t_0). \quad (7.111)$$

Дифференцируя (7.111) по вектору $x(t_u)$, с учетом (7.102) получим окончательный вид оптимального управления

$$u_{v, \text{опт}}(t_u) = -l(t, t_v) K \Delta_p \Phi^T \times \\ \times \left[\frac{\partial X^T(x, t_k, t_u)}{\partial x(t_u)} \frac{\partial V_{\text{зад}}^T(x, t_k)}{\partial x(t_k)} + \right. \\ \left. + \int_{t_u}^{t_v} \frac{\partial X^T(x, \tau, t_u)}{\partial x(t_u)} \frac{\partial Q^T(x, \tau)}{\partial x(\tau)} d\tau \right]. \quad (7.112)$$

где

$$\frac{\partial X^T(x, \tau, t_u)}{\partial x(t_u)} = \left[\frac{\partial X_j^T}{\partial x_i} \right], \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (7.113)$$

Определение управления $u_{v, \text{опт}}$ в прогнозирующей модели (7.110) является циклическим процессом, в котором формирование управляющего сигнала происходит в моменты времени t_u . Длительность цикла $\Delta t_u v$ равна $t_{v+1} - t_v$ и определяется, с одной стороны, динамическими свойствами объекта, а с другой – объемом выполняемых вычислений и производительностью компьютера. Тогда число включений M , входящих в (7.99), определится соотношением $(t_k - t_0) / \Delta t_u$. Начальные условия для (7.100) задаются сигналами датчиков, контролирующих $x(t)$ в момент времени t_u , и соответствуют началу очередного цикла определения управления u_v .

С учетом (7.101) уравнения относительного движения КА (7.98) будут иметь вид

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -x_2 \\ -x_1 x_3 \\ 2x_2 x_3 / x_1 \\ -x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1/x_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \Delta_{p1} \sum_{v=1}^M l(t, t_v) l(u_{v1} \text{sign } u_{v1}) \text{sign } u_{v1} \\ \Delta_{p2} \sum_{v=1}^M l(t, t_v) l(u_{v2} \text{sign } u_{v2}) \text{sign } u_{v2} \end{bmatrix}. \quad (7.114)$$

где

$$\Delta_{p1} = a_x = 0,041 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}; \Delta_{p2} = a_y = 0,041 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Функции $V_{\text{зад}}, Q$ функционала (7.7) запишем в виде

$$V_{\text{зад}} = 0,5 [\alpha_1 (x_1 - x_1^k)^2 + \alpha_2 (x_2 - x_2^k)^2 + \\ + \alpha_3 (x_3 - x_3^k)^2 + \alpha_4 (x_4 - x_4^k)^2], \\ Q_{\text{кач}} = 0,5 [\beta_2 (x_2 - x_2^k)^2 + \beta_3 (x_3 - x_3^k)^2 + \\ + \beta_4 (x_4 - x_4^k)^2], \quad (7.115)$$

$$Q_{\text{штр1}} = \begin{cases} \gamma_1 (d - x_1) & \text{при } x_1 < d, \\ 0 & \text{при } x_1 \geq d, \end{cases}$$

$$Q_{\text{штр2}} = \begin{cases} \gamma_2 (|x_3| - b) & \text{при } |x_3| > b, \\ 0 & \text{при } |x_3| \leq b, \end{cases}$$

$$Q = Q_{\text{кач}} + Q_{\text{штр1}} + Q_{\text{штр2}}, \quad (7.116)$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_1, \gamma_2$ – положительные коэффициенты.

Необходимо отметить, что структура и параметры функций $V_{\text{зад}}$ и Q задаются исходя из опыта решения аналогичных задач. Как показали результаты математического моделирования в условиях данного примера, наиболее рациональным является использование переменной структуры $V_{\text{зад}}$ и Q в зависимости от текущего времени t решения задачи. При этом функции (7.115) и (7.116) имеют вид:

1) для $t \in [0, 80 \text{ с}]$

$$V_{\text{зад}} = 3 \cdot 10^4 (x_4 - x_4^k)^2, \quad Q_{\text{кач}} = 0, \quad Q_{\text{штр2}} = 0, \quad (7.117)$$

2) для $t \in [80 \text{ с}, 240 \text{ с}]$

$$V_{\text{мг}} = 4(x_1 - x_1^k)^2 + 24,3 \cdot 10^3 (x_2 - x_2^k)^2 + \\ + 2,0 \cdot 10^7 (x_3 - x_3^k)^2 + 9 \cdot 10^4 (x_4 - x_4^k)^2, \\ Q_{\text{кач}} = 0,$$

$$Q_{\text{штр1}} = \begin{cases} 8,88 \cdot 10^3 (100 - x_1) & \text{при } x_1 < 100 \text{ м}, \\ 0 & \text{при } x_1 \geq 100 \text{ м}, \end{cases}$$

$$Q_{\text{штр2}} = \begin{cases} 10^4 (|x_3| - 0,02) & \text{при } |x_3| > 0,02 \text{ с}^{-1}, \\ 0 & \text{при } |x_3| \leq 0,02 \text{ с}^{-1}, \end{cases} \quad (7.118)$$

3) для $t \in [240 \text{ с}, 270 \text{ с}]$

$$V_{\text{звл}} = 0, \quad Q_{\text{кач}} = 0,5(x_2 - x_2^k)^2 + \\ + 1,25 \cdot 10^3 (x_3 - x_3^k)^2 + 31,3(x_4 - x_4^k)^2,$$

$$Q_{\text{штр1}} = 0, \\ Q_{\text{штр2}} = \begin{cases} 100(|x_3| - 0,008) & \text{при } |x_3| > 0,008 \text{ с}^{-1}, \\ 0 & \text{при } |x_3| \leq 0,008 \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (7.119)$$

Таким образом, на участках 1 и 2 решается задача терминального управления с длительностью $t_k = 240 \text{ с}$ и временем прогноза, уменьшающимся с каждым шагом на Δt_u , а на участке 3 – задача не-терминального управления с постоянным временем прогноза, которое было принято равным 4 с.

Коэффициенты K функционала (7.7), $t_{\text{кпр}}$, а также все значения $\Delta t_u = t_{v+1} - t_v$ име-

ли следующие значения:

1) для $t \in [0, 80 \text{ с}]$

$$K_1^1 = 3,3 \cdot 10^{-7}, \quad K_2^1 = 5,3 \cdot 10^{-10}, \\ \Delta t_u = 4 \text{ с}, \quad t_{\text{кпр}} = 240 \text{ с};$$

2) для $t \in [80 \text{ с}, 240 \text{ с}]$

$$K_1^2 = 8,7 / x_1^2, \quad K_2^2 = 5,6 \cdot 10^{-3} / x_1, \\ \Delta t_u = 4 \text{ с}, \quad t_{\text{кпр}} = 240 \text{ с};$$

3) для $t \in [240 \text{ с}, 270 \text{ с}]$

$$K_1^3 = 200, \quad K_2^3 = 9,7, \quad \Delta t_u = 1 \text{ с}, \quad t_{\text{кпр}} = 4 \text{ с}.$$

Уравнения (7.110) запишутся так:

$$\ddot{x}_1 - x_2 = 0, \quad \ddot{x}_2 - x_1 x_3^2 = 0, \quad (7.120) \\ \ddot{x}_3 + 2x_2 x_3 = 0, \quad \ddot{x}_4 - x_3 = 0,$$

а их решения имеют вид (80)

$$x_1 = \sqrt{x_2^0 t^2 + x_1^0 x_3^0 t^2 + 2x_1^0 x_2^0 t + x_1^0}, \\ x_2 = (x_2^0 t^2 + x_1^0 x_3^0 t^2 + x_1^0 x_2^0 t) / x_1, \\ x_3 = x_1^0 x_1^0 / x_1^2, \\ x_4 = x_4^0 + \arctg[x_1^0 x_3^0 t / (x_1^0 + x_2^0 t)]. \quad (7.121)$$

Наличие аналитического решения (7.121) уравнений (7.120) позволяет применять рассмотренную выше модификацию алгоритма. Оптимальное управление определяется выражением (7.112), матрица Якоби (7.113) имеет вид

$$\frac{\partial X^T(x, t, t_u)}{\partial x(t_u)} = \begin{bmatrix} \frac{B}{\sqrt{a}} & \frac{B_4 a - B B_1}{a^{3/2}} & \frac{2(x_1^0 x_3^0 a - x_1^0 x_3^0 B)}{a^2} & B_2 C_1 \\ \frac{C}{\sqrt{a}} & \frac{B_3 a - C B_1}{a^{3/2}} & \frac{-2x_1^0 x_3^0 C}{a^2} & -B_2 D \\ \frac{B_3}{\sqrt{a}} & \frac{B_6 a - B_3 B_1}{a^{3/2}} & \frac{x_1^0 a - 2x_1^0 x_3^0 B_3}{a^2} & \frac{x_1^0 t}{B_2(x_1^0 + x_2^0 t)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7.122)$$

$$x(t_u) = x^0; \quad a = (x_1^0 + x_1^0 x_3^0) t^2 + 2x_1^0 x_2^0 t + x_1^0;$$

$$B = x_1^0 x_3^0 t^2 + x_1^0 t + x_1^0; \quad B_1 = (x_2^0 + x_1^0 x_3^0) t + x_1^0 x_2^0;$$

$$B_2 = \left[1 + \left(\frac{x_1^0 x_3^0 t}{x_1^0 + x_2^0 t} \right)^2 \right]; \quad C_1 = \frac{x_3^0 t (x_1^0 + x_2^0 t) - x_1^0 x_3^0 t}{(x_1^0 + x_2^0 t)^2};$$

$$C = x_2^0 t^2 + x_1^0 t; \quad D = x_1^0 x_3^0 t^2 / (x_1^0 + x_2^0 t)^2; \quad B_3 = x_1^0 x_3^0 t^2;$$

$$B_4 = 2x_1^0 x_3^0 t^2 + x_2^0; \quad B_5 = 2tx_2^0 + x_1^0; \quad B_6 = 2tx_1^0 x_3^0.$$

Функция Q из (7.7) содержит члены $Q_{\text{шпр1}}$ и $Q_{\text{шпр2}}$, которые в процессе интегрирования имеют участки с нулевыми значениями. Поэтому для получения аналитических выражений, позволяющих вычислить

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial X^T(x, \tau, t_u)}{\partial x(t_u)} \frac{\partial Q_{\text{шпр}}^T}{\partial x(\tau)} d\tau,$$

необходимо определить число ненулевых участков и моменты времени их начала и конца. На основе выражений (7.121) можно сделать вывод, что в процессе прогноза будущего положения КА возможно только однократное нарушение "эксплуатационной" области по параметрам x_1 и x_3 .

Тогда при $x_2^0 < 0$ в момент времени $t_c = -x_1^0 x_2^0 / (x_2^0 + x_1^0 x_3^0)$ x_1 имеют место тождества $x_{1\text{min}}^2 = x_1^0 x_3^0 / (x_2^0 + x_1^0 x_3^0)$.

$|x_3|_{\text{max}} = x_1^0 |x_3^0| / x_{1\text{min}}^2$. Если $x_{1\text{min}}^2 < 100^2$ и $|x_3|_{\text{max}} > b$ то существуют участки прогнозируемого полета, на которых происходит нарушение "эксплуатационных" зон по параметрам x_1 и x_3 . Моменты времени начала и конца этих участков можно определить следующим образом. На основе первого выражения (7.121) для параметра

x_1 запишем уравнение

$$(x_2^0 + x_1^0 x_3^0) T^2 + 2x_1^0 x_2^0 T + x_1^0 - 10^4 = 0, \quad (7.123)$$

которое является квадратным относительно T . Его корни определяют моменты выхода (T_1) и обратного входа (T_2) в "эксплуатационную" область по параметру x_1 .

Для x_3 соответствующие моменты времени N_1 и N_2 определим из равенства

$$x_1^2 b = x_1^0 \left| x_3^0 \right| \text{ или } b(x_2^0 + x_1^0 x_3^0) N^2 + 2x_1^0 x_2^0 b N + x_1^0 b^2 - x_1^0 \left| x_3^0 \right| = 0.$$

Аналитические выражения для оптимальных управлений и следовательно для ОЭИ можно записать на основе (7.115)–(7.121) с учетом (7.112):

1. Для первого участка ($t \in [0, 80 \text{ с}]$):

$$u_{v1} = 1(t, t_v) K_1^1 \Delta_{p1} (\alpha_1 B_2 D S + \gamma_1 F_1),$$

$$u_{v2} = -1(t, t_v) K_2^1 \Delta_{p2} \left[\frac{1}{\alpha_1} \frac{x_1^0 t_p S}{B_2 (x_1^0 + x_2^0 t_p)} - \gamma_1 F_2 \right],$$

$$t_p = t_{\text{шпр}} - t_u;$$

$$S = x_4^0 + \arctg \left[x_1^0 x_3^0 t_p / (x_1^0 + x_2^0 t_p) \right];$$

$$\alpha_1 = 6 \cdot 10^{-4}; \gamma_1 = 4,4 \cdot 10^{-5};$$

$$F_1 = \begin{cases} 0 & \text{при } x_2^0 > 0 \text{ и } x_1^{0^2} > 100^2 \text{ м}^2, \\ 0 & \text{при } x_1^0 > 100^2 \text{ м}^2, \\ 0 & \text{при } t_H \notin [0, t_{\text{кпр}} - t_u], \\ \int_{t_u}^{t_{\text{кпр}}} \frac{C(t)dt}{\sqrt{a(t)}} & \text{при } x_{1\min}^2 < 100^2 \text{ и } t_H \in [0, t_{\text{кпр}} - t_u] \text{ или } x_1^{0^2} < 100^2; \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } x_2^0 > 0 \text{ и } x_1^{0^2} > 100^2 \text{ м}^2, \\ 0 & \text{при } x_{1\min}^2 > 100^2 \text{ м}^2, \\ 0 & \text{при } t_H \notin [0, t_{\text{кпр}} - t_u], \\ \int_{t_u}^{t_{\text{кпр}}} \frac{B_5(t)dt}{\sqrt{a(t)}} & \text{при } x_{1\min}^2 < 100^2 \text{ и } t_H \in [0, t_{\text{кпр}} - t_u] \text{ или } x_1^{0^2} < 100^2. \end{cases}$$

2. Для второго участка ($t \in [80 \text{ с}, 240 \text{ с}]$)

$$\begin{aligned} u_{v1} = & -l(t, t_v) K_1^2 \Delta_{p1} \left[\alpha_2 (\sqrt{a} - 110) \frac{C}{\sqrt{a}} + \alpha_3 \left(\frac{B_1}{\sqrt{a}} + 0,3 \right) \frac{B_5 a - C B_1}{a^{3/2}} - \right. \\ & \left. - \alpha_4 \frac{x_1^{0^2} x_3^{0^2} C}{a^3} - \alpha_5 B_2 D S - \gamma_2 F_1 + \gamma_3 F_3 \right], \\ u_{v2} = & -l(t, t_v) K_2^2 \Delta_{p2} \frac{1}{x_1^0} \left[\alpha_2 (\sqrt{a} - 110) \frac{B_2}{\sqrt{a}} + \alpha_3 \left(\frac{B_1}{\sqrt{a}} + 0,3 \right) \frac{B_6 a - B_3 B_1}{a^{3/2}} + \right. \\ & \left. + \alpha_4 \frac{(x_1^{0^2} a - 2 x_1^{0^2} x_1^0 B_5) x_1^0 x_3^{0^2}}{a^5} - \alpha_5 \frac{x_1^0 t_v S}{B_2 (x_1^0 + x_2^0 x_3^0)} - \gamma_2 F_2 + \gamma_3 F_4 \right], \end{aligned}$$

$$\alpha_2 = 8; \alpha_3 = 48,6 \cdot 10^3; \alpha_4 = 4 \cdot 10^7; \alpha_5 = 18 \cdot 10^4; \gamma_2 = 8,88 \cdot 10^2; \gamma_3 = 10^5;$$

$$F_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } x_2^0 > 0 \text{ и } |x_3^0| < b, \\ 0 & \text{при } |x_3|_{\max} < b, \\ 0 & \text{при } t_H \notin [0, t_{\text{кпр}} - t_u], \\ \int_{t_u}^{t_{\text{кпр}}} -\frac{2x_1^{0^2} x_3^0 C(t)}{a^3(t)} dt & \text{при } |x_3^0| > b \text{ или } |x_3|_{\max} > b \text{ и } t_H \in [0, t_{\text{кпр}} - t_u]; \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } x_2^0 > 0 \text{ и } |x_3^0| < b, \\ 0 & \text{при } |x_3|_{\max} < b, \\ 0 & \text{при } t_{\text{н}} \notin [0, t_{\text{кпр}} - t_u], \\ \int_{t_u}^{t_{\text{кпр}}} [x_1^0 a(t) - 2x_1^{0^2} x_3^0 B_3(t)] / a^2(t) dt & \text{при } |x_3^0| \geq b \\ \text{или } |x_3|_{\max} \geq b \text{ и } t_{\text{н}} \in [0, t_{\text{кпр}} - t_u]. \end{cases}$$

3. Для третьего участка ($t \in [240 \text{ с}, 270 \text{ с}]$). Применение аналитического решения (7.121) системы (7.120) к поиску ОЭИ в этом случае приводит к достаточно громоздким выражениям. Учитывая, что время прогноза мало ($t_{\text{кпр}} = 4 \text{ с}$), наиболее рациональным является поиск управлений с использованием приближенного решения системы (7.120). Воспользуемся методом рекуррентных соотношений [85].

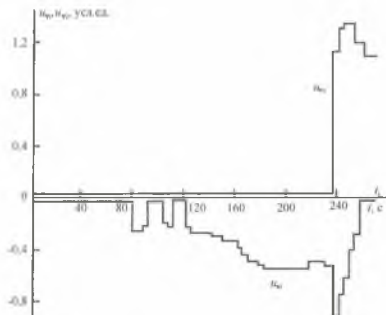
Решение системы (7.120) имеет вид

$$x_1 = x_1^0 + x_2^0 t + \frac{x_1^0 x_1^0 t^2}{2} - \frac{x_1^0 x_3^0 t^3}{2},$$

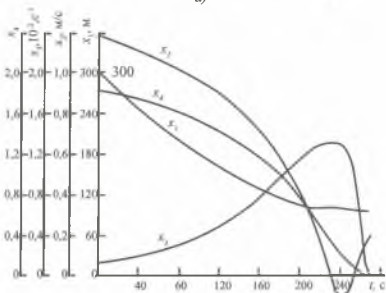
$$\begin{aligned} x_2 &= x_2^0 + x_1^0 x_3^0 t - \frac{3x_3^{0^2} x_2^0 t^2}{2}, \\ x_3 &= x_3^0 - \frac{2x_1^0 x_2^0 t}{x_1^0} + \frac{3x_2^{0^2} x_1^0 t^2}{x_1^0} - x_3^0 t^2, \\ x_4 &= x_4^0 + x_2^0 t - \frac{x_3^0 x_1^0 t^2}{x_1^0} + \frac{x_2^0 x_3^0 t^3}{x_1^0} - \frac{x_3^0 t^3}{3}. \end{aligned} \quad (7.124)$$

Использование (7.124) с учетом (7.112), (7.113) приводит к следующим выражениям для оптимального управления:

$$\begin{aligned} u_{v1} &= -1(t, t_v) K_1^3 \Delta_{p1} \left\{ \int_0^{t_{\text{кпр}}} \frac{\partial x_2(t)}{\partial x_2^0} [x_2(t) + 0,3] dt + \right. \\ &\quad \left. + \alpha_6 \int_0^{t_{\text{кпр}}} \frac{\partial x_3(t)}{\partial x_2^0} x_3(t) dt + \alpha_7 \int_0^{t_{\text{кпр}}} \frac{\partial x_4(t)}{\partial x_2^0} x_4(t) dt + \gamma_4 F_3 \right\} = \\ &= -1(t, t_v) K_1^3 \Delta_{p1} \left[4x_2^0 + 8x_1^0 x_3^0 - 64x_3^{0^2} x_2^0 - 96x_3^{0^4} x_1^0 + 460,8x_3^0 x_2^0 + 1,2 - \right. \\ &\quad \left. - 9,6x_3^0 + \frac{t^6}{6^4} (213,3x_1^{0^2} x_2^0 x_3^{0^2} - 1152x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 3696,4x_2^{0^3} x_3^0 - 1228,8x_2^0 x_3^0 x_1^0 - \right. \\ &\quad \left. - 16x_1^{0^3} x_3^0 + 64x_1^0 x_3^0 x_1^0) + \frac{\alpha_7}{x_1^0} (128x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 + 605,4x_1^{0^2} x_2^0 x_3^0 - 2047,9x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 3538,3x_2^{0^2} x_3^0 - \right. \\ &\quad \left. - 1179,3x_1^{0^2} x_2^0 x_3^0 x_4^0 - 21,3x_1^{0^3} x_2^0 x_4^0 - 64x_1^{0^2} x_3^0 x_4^0 + 227,6x_1^0 x_3^0 x_4^0) + \gamma_4 F_3 \right], \end{aligned}$$



а)



б)

Рис. 7.10. Результаты моделирования:

а – значения управлений, сформированных ОЭИ в каждом цикле решения задачи;
 б – изменения компонент вектора состояния при реализации оптимального управления

$$\begin{aligned}
u_{v,2} = & -1(t, t_v) K_2^{-2} \Delta_{v2} \frac{1}{x_1} \left\{ \int_0^{t_{vmp}} \frac{\partial x_3(t)}{\partial x_1^0} [x_2(t) + 0,3] dt + \right. \\
& \left. + \alpha_6 \int_0^{t_{vmp}} \frac{\partial x_3(t)}{\partial x_3^0} x_3(t) dt + \alpha_7 \int_0^{t_{vmp}} \frac{\partial x_4(t)}{\partial x_4^0} x_4(t) dt + \gamma_4 F_4 \right\} = \\
= & -1(t, t_v) K_2^{-2} \Delta_{v2} \left[\frac{1}{x_1^0} [(16x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 42,7x_1^0 x_3^0 x_2^0 - 384x_1^0 x_3^0 x_2^0 + 4,8x_1^0 x_3^0 + 925,2x_3^0 x_2^0 - \right. \\
& - 64x_3^0 x_2^0 - 19,2x_3^0 x_2^0) + \frac{\alpha_6}{x_1^0} (4x_1^0 x_3^0 - 32x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 243,3x_1^0 x_2^0 x_3^0 - 21,3x_1^0 x_3^0 - 768x_3^0 x_2^0 x_3^0 + \\
& + 128x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 1843x_2^0 x_3^0 - 614x_1^0 x_2^0 x_3^0 - 64x_1^0 x_3^0 + 384x_1^0 x_2^0 x_3^0 - 1843x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 614x_1^0 x_3^0) + \\
& + \frac{\alpha_7}{x_1^0} (4x_1^0 x_3^0 + 21,3x_1^0 x_3^0 - 128x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 614x_1^0 x_2^0 x_3^0 - 273x_1^0 x_3^0 - 21,3x_1^0 x_2^0 x_3^0 - 1365x_3^0 x_2^0 x_3^0 + \\
& \left. + 910x_1^0 x_2^0 x_3^0 + 64x_1^0 x_2^0 x_4^0 + 2340x_2^0 x_3^0 - 3120x_1^0 x_2^0 x_3^0 - 64x_1^0 x_3^0 x_4^0 + 780x_1^0 x_3^0) + \gamma_4 F_4 \right],
\end{aligned}$$

где $\alpha_6 = 2,5 \cdot 10^3$; $\alpha_7 = 62,6$; $\gamma_4 = 100$.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 7.10. На рис. 7.10, а приведены значения управлений, сформированных ОЭИ в каждом цикле решения задачи, на рис. 7.10, б — графики изменения компонент вектора состояния при реализации оптимального управления. Состояние, достигнутое к заданному моменту t_k , характеризуется компонентами $x_1 = 100,4$ м, $x_2 = -0,22$ м · с⁻¹, $x_3 = x_4 = 0$. В процессе моделирования значения u_{v1} и u_{v2} , не превышающие 0,2 с, принимались равными нулю.

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый алгоритм (в терминологии непрерывных процессов) принадлежит классу управления положением исполнительных органов объекта и позволяет получить управление с большим количеством включений двигателей. Данный алгоритм имеет явные вычислительные преимущества перед алгоритмом п. 7.1 и его целесообразно использовать, если на число включений двигателей не наклады-

вается ограничение или это ограничение достаточно велико.

7.5. ОБРАБОТКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ ПКА ПРИ СОВМЕЩЕНИИ НЕПРЕРЫВНОГО И РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Задача смешанного управления возникает в том случае, если в процессе функционирования необходимо одновременно управлять как релейными, так и непрерывными исполнительными органами. Примером может служить траекторное управление КА с одним или двумя двигателями постоянной тяги [85]. В этом случае к органам релейного управления относятся двигатели, а непрерывные управления представляют собой направляющие косинусы ориентации вектора тяги в выбранной системе координат. Рассмотрим особенности синтеза оптимального управления в этом случае.

Рассмотрим движение КА, описываемое моделью

$$\dot{x} = f(x, t) + \varphi(x, t)G(\vartheta_{\text{ри}}, \sigma), \quad (7.125)$$

с релейно-импульсными и непрерывными рулевыми органами, положение которых характеризуют векторы $\vartheta_{\text{ри}}$ и σ соответственно.

Пусть вектор $\vartheta_{\text{ри}}$ представляется функцией (7.3). Для релейных рулевых органов в качестве компонент объекта управления принимаются моменты переключения t'_μ функции $\vartheta_{\text{ри}i}$, а для непре-

рывных управлений – вектор σ :

$$t'_\mu = u_\mu, \quad \dot{\sigma} = u^*, \quad (7.126)$$

где σ – l -мерный вектор положения непрерывных органов объекта управления.

Приведенные выражения определяют уравнения управляемого процесса.

Минимизируемый функционал с учетом изложенных особенностей смешанного управления зададим в следующей форме:

$$I = V_{\text{зад}}(x(t_k), t_k) + \int_{t_0}^{t_k} Q(x(\tau), \tau) d\tau + \\ + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} (u_\mu^\top K_{\text{ри}}^{-1} u_\mu + u_{\text{отт}}^\top K_{\text{ри}}^{-1} u_{\text{отт}} + u^{*\top} K_n^{-1} u^* + u_{\text{отт}}^{*\top} K_n^{-1} u_{\text{отт}}^*) d\tau. \quad (7.127)$$

Заметим, что составляющая функции Q функционала (7.127) дополнительно содержит компоненту штрафа $Q_{\text{штр}}$, необходимую для "защиты" возможного нарушения последовательности переключения релейных рулевых органов, определяемой выражением (7.3). Всюду в дальнейшем $\vartheta_{\text{ри}i0} = 0$ и все нечетные моменты времени $t'_1, t'_3, \dots, t'_{m-1}$ соответствуют положительному приращению функции $\vartheta_{\text{ри}i}$, а четные моменты времени $t'_2, t'_4, \dots, t'_m$ – отрицательному.

Нами рассматривается релейно-импульсное управление с одним уровнем переключения разной полярности, поэтому для каждой ближайшей пары переключений соблюдается следующее правило. Если первое переключение функции (7.3) положительное, то второе обязательно должно быть отрицательным или наоборот. Несоблюдение такой последовательности ведет к выходу из области допустимых управлений и требует защитных мер. Следовательно, математические выражения для функции штрафа будут иметь вид

$$Q_{\text{штр}i} = \begin{cases} 0, & \text{если } t_{1i} \in t_{\text{н}} \text{ а } t_{2i} \notin t_{\text{н}} \text{ или } t_{1i} \in t_{\text{п}} \text{ а } t_{2i} \in t_{\text{п}} \\ a_i(t - t_{2i}), & \text{если } t_{1i} \text{ и } t_{2i} \in t_{\text{н}} \text{ или } t_{1i} \text{ и } t_{2i} \in t_{\text{п}} \end{cases}, \quad Q_{\text{штр}} = \sum_{i=1}^L Q_{\text{штр}i}, \quad (7.128)$$

где i – номер пары переключения функции (7.3); L – число пар переключения этой функции; $t_{\text{н}}, t_{\text{п}}$ – последовательности четных и нечетных моментов времени $t_{\text{н}}^j$; a – положительный коэффициент; t_{1i} и t_{2i} – моменты первого и второго пе-

реключения i -й пары ($t_{1i} \leq t_{2i}$).

С использованием моментов времени t_μ релейно-импульсного управления и вектора σ непрерывного управления запишем уравнения прогнозирующей модели

$$\begin{aligned}\frac{dx_m}{dt} &= f_m(x_m, \tau) + \varphi_m(x_m, \tau) G_m(\vartheta_{pi}, \sigma), \\ t_{\mu} &= 0, \quad \dot{\sigma} = 0.\end{aligned}\quad (7.129)$$

В соответствии с алгоритмом одновременно с (7.129) интегрируется уравнение чувствительности. В данном случае с учетом особенностей объекта управления имеем два уравнения чувствительности вида

$$\begin{aligned}\frac{dZ_{pi}}{dt} &= \left[\frac{\partial f_m}{\partial x_m} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} G_m(\vartheta_{pi}, \sigma) \right] Z_{pi} + \\ &+ \varphi \frac{\partial G_m(\vartheta_{pi}, \sigma)}{\partial t_{\mu}},\end{aligned}\quad (7.130)$$

$$\begin{aligned}\frac{dZ_{ii}}{dt} &= \left[\frac{\partial f_m}{\partial x_m} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} G_m(\vartheta_{pi}, \sigma) \right] Z_{ii} + \\ &+ \varphi \frac{\partial G_m(\vartheta_{pi}, \sigma)}{\partial \sigma}\end{aligned}\quad (7.131)$$

В силу особенностей функции (7.3) дифференцирование $G(\vartheta_{pi}, \sigma)$ по любому из моментов t_{μ} как параметру требует применения аппарата обобщенных функций, рассмотренного в п. 7.1. В этом случае можно записать

$$\begin{aligned}\frac{\partial G_m(\vartheta_{pi}, \sigma)}{\partial t_{\mu}} &= \Delta_{pi} (-1)^{\mu} \delta(t - t'_{\mu}) \times \\ &\times F(\vartheta_{pi}, \sigma),\end{aligned}\quad (7.132)$$

где $\delta(t - t'_{\mu})$ – дельта-функция; $F(\vartheta_{pi}, \sigma)$ – функция, получаемая из $G_m(\vartheta_{pi}, \sigma)$ после выполнения дифференцирования $\partial G_m(\vartheta_{pi}, \sigma) / \partial t_{\mu}$. Частная производная функция $G_m(\vartheta_{pi}, \sigma)$ по вектору t_{μ} представляет собой матричную функцию, у которой (7.132) определяет элемент i -й строки и μ -го столбца.

Полученные решения уравнений (7.129)–(7.131) используются для опреде-

ления управлений по формулам

$$u_{\text{зад}} = -K_{pi} \left[Z'_{pi}(t_k) \frac{\partial V'_{\text{зад}}(t_k)}{\partial x_m(t_k)} + \right. \quad (7.133)$$

$$\left. + \int_0^{\tau} \left[Z'_{pi}(\tau) \frac{\partial Q'(\tau)}{\partial x_m(\tau)} + \frac{\partial Q'_{\text{опт}}}{\partial u} \right] d\tau \right],$$

$$u_{\text{опт}} = -K_{ii} \left[Z'_{ii}(t_k) \frac{\partial V'_{\text{зад}}(t_k)}{\partial x_m(t_k)} + \right. \quad (7.134)$$

$$\left. + \int_0^{\tau} \left[Z'_{ii}(\tau) \frac{\partial Q'(\tau)}{\partial x_m(\tau)} d\tau \right] \right].$$

Таким образом, управление объектом (7.125) с одновременно работающими релейно-импульсными и непрерывными органами сводится к последовательному выполнению в каждом цикле формирования управлений следующих операций.

1. По результатам измерения (оценки) состояния объекта управления и его рулевых органов формируются начальные условия для (7.131). Одновременно по априорным данным (если это первый цикл) и по результатам интегрирования (7.129) на предыдущем цикле (для всех последующих циклов) задаются начальные условия для векторов ϑ_{pi}, σ функции G .

2. В ускоренном темпе моделируется движение объекта с помощью уравнений (7.129). Здесь $G_m(\vartheta_{pi}, \sigma)$ – моделируемая векторная функция. Компоненты вектора ϑ_{pi} этой функции, а значит, и сама функция G_m в фиксированные моменты времени t'_{μ} претерпевают скачкообразные изменения.

3. В том же ускоренном темпе одновременно с (7.129) интегрируются матричные уравнения чувствительности (7.130) и (7.131) с нулевыми начальными условиями. Отметим, что в (7.130) в моменты времени t'_{μ} на основании (7.132)

скачкообразно изменяются некоторые элементы матрицы $Z_{pi}(\tau)$. Эти изменения можно учесть, если воспользоваться следующим правилом. В матричной функции $\partial G_M(\vartheta_{pi}, \sigma) / \partial \mu_i^k$, определяемой выражением (7.132), следует присвоить значения $\Delta_{pi1} F(\vartheta_{pi1}, \sigma)$ и $-\Delta_{pi1} F(\vartheta_{pi1}, \sigma)$ тем элементам, у которых дельта-функции для данного момента времени t_0 не равны нулю, а остальным элементам присвоить нулевые значения.

4. По результатам интегрирования (7.129)–(7.131) вычисляются управления (7.133), (7.134), где $V_{зад}$ и Q – функции заданного критерия оптимальности (7.127).

5. Сформированные управления $u_{\mu, \text{опт}}$ и $u_{\text{опт}}^*$ используются как постоянные для объекта (7.126) на протяжении очередного цикла формирования управления вплоть до получения новых значений $u_{\text{опт}, \mu}$ и $u_{\text{опт}}^*$. Изменения во времени компонент t_{μ}^i соответствуют смещению моментов действия релейно-импульсных функций (7.3) в сторону отдаления ($t_{\mu}^i > 0$) или приближения ($t_{\mu}^i < 0$) соответствующих переключений.

6. В соответствии с п. 7.1 при достижении текущим временем t формирования управления $u_{\text{опт}, \mu}$, очередного момента переключения i -го рулевого органа (при приближении $t - t_{\mu}^i$ к нулю или достаточно малой величине) производится действительное (а не моделируемое) переключение i -го релейно-импульсного рулевого органа. Соответствующим образом меняется и значение вектора ϑ_{pi0} , используемого на первом шаге алгоритма.

Рассмотрим относительное движение двух КА в орбитальной системе координат при сближении. Уравнения, описы-

вающие этот процесс, имеют вид [81]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= 2\omega x_4 + a_x, \\ \dot{x}_3 &= x_4, \\ \dot{x}_4 &= 3\omega^2 x_3 - 2\omega x_2 + a_y, \\ \dot{x}_5 &= x_6, \\ \dot{x}_6 &= -\omega^2 x_5 + a_z, \end{aligned} \quad (7.135)$$

где x_1, x_3, x_5 – координаты активного КА относительно пассивного КА; x_2, x_4, x_6 – скорости изменения координат; a_x, a_y, a_z – проекции управляющего ускорения на оси орбитальной системы координат; ω – угловая скорость орбитального движения пассивного ПКА. Рис. 7.11 (см. цветную вкладку) иллюстрирует это движение.

При полярной схеме построения двигателя постоянной тяги положение вектора ускорения тяги $a(t)$ в пространстве определяется углами α_1 и α_2 :

$$\begin{aligned} a_x &= a(t) \cos \alpha_1(t) \cos \alpha_2(t), \\ a_y &= a(t) \sin \alpha_1(t), \\ a_z &= a(t) \cos \alpha_1(t) \sin \alpha_2(t). \end{aligned}$$

Необходимо перевести систему из начального состояния ($x_1^0 = 9000$ м, $x_2^0 = 0$, $x_3^0 = 1400$ м; $x_4^0 = 0$; $x_5^0 = 800$ м, $x_6^0 = 0$) за время $t_k - t_0 = 770$ с в конечное состояние ($x_1^k = 500 \pm 150$ м, $x_2^k = -2,3 \pm 2,0$ м/с, $x_3^k = 20 \pm 70$ м, $x_4^k = 0 \pm 2,0$ м/с, $x_5^k = 0 \pm 30$ м, $x_6^k = \pm 1$ м/с).

При этом вектор ϑ_{pi} релейно-импульсного управления представляет собой циклограмму включения и выключения двигателя, которую в соответствии с (7.3) представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \vartheta_{pi}(t, t_1, t_2, t_3, t_4) &= 0 + \varepsilon 1(t - t_1) - \\ &- \varepsilon 1(t - t_2) + \varepsilon 1(t - t_3) - \varepsilon 1(t - t_4), \end{aligned}$$

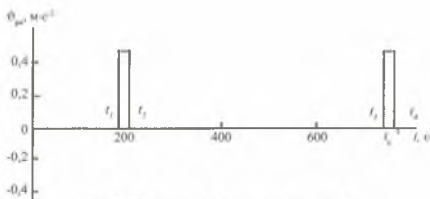


Рис. 7.12. Циклограмма включения двигателей

где ε – ускорение, создаваемое двигателем. График этой циклограммы, выбранный произвольно, показан на рис. 7.12.

Векторная функция $G(\vartheta_{\text{пр}}, \sigma)$ будет

иметь вид

$$G(\vartheta_{\text{пр}}, a) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vartheta_{\text{пр}} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ 0 \\ \vartheta_{\text{пр}} \sin \alpha_1 \\ 0 \\ \vartheta_{\text{пр}} \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \end{bmatrix}$$

Функция $V_{\text{зд}}$ функционала (7.127) является скалярной функцией конечного состояния КА и "отвечает" за выход в заданное конечное положение с указанной точностью. Одним из способов ее задания [79] является квадратичная форма. В условиях данного примера

$$\begin{aligned} V_{\text{зд}} = & 0,5\beta_1(x_1 - 50)^2 + \\ & 0,5\beta_2(x_2 + 0,3)^2 + 0,5\beta_3(x_3 - 20)^2 + \\ & + 0,5\beta_4x_4^2 + 0,5\beta_5x_5^2 + 0,5\beta_6x_6^2. \end{aligned}$$

Функция Q функционала (7.129) имеет несколько составляющих. Эти составляющие отражают требования к каче-

ству переходного процесса [83], к уровню затрат расходов рабочего тела на управление или включают функции штрафа для ограничения "эксплуатационных" областей вектора состояния КА, а также функции штрафа для обеспечения "защиты" выхода из области допустимых управлений.

Вид функции Q зависит от многих факторов, которые выдвигаются в процессе решения задачи сближения. В нашем примере для простоты примем $Q = 0$.

Уравнения (7.126) запишутся так:

$$\ddot{u}_i = u_{\mu} \quad (\mu = \overline{1,4}), \quad \ddot{\sigma}_i = a_i = u_i^* \quad (i = \overline{1,2}).$$

Входящие в (7.130), (7.131) функции определяются соотношениями

$$\frac{\partial f_{\text{ж}}}{\partial x_{\text{ж}}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2\omega & 3\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega^2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \eta_i}{\partial x_{\text{ж}}} G_{\text{ж}}(\vartheta_{\text{пр}}, \sigma) = 0.$$

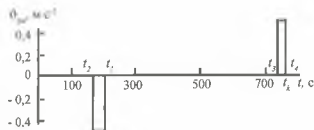


Рис. 7.13. Реализованная циклограмма включения двигателей

$$\frac{\partial G_{\text{м}}(\vartheta_{\text{рн}}, \alpha)}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & -\varepsilon \delta(\tau - t_2) \times & \varepsilon \delta(\tau - t_3) \times & -\varepsilon \delta(\tau - t_4) \times \\ \times \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & \times \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & \times \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & \times \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & -\varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & \varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & -\varepsilon \delta(\tau - t_1) \times \\ \times \sin \alpha_1 & \times \sin \alpha_1 & \times \sin \alpha_1 & \times \sin \alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & -\varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & \varepsilon \delta(\tau - t_1) \times & -\varepsilon \delta(\tau - t_1) \times \\ \times \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 & \times \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 & \times \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 & \times \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial G_{\text{м}}(\vartheta_{\text{рн}}, \alpha)}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\vartheta_{\text{рн}} \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 & -\vartheta_{\text{рн}} \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \\ 0 & 0 \\ \vartheta_{\text{рн}} \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\vartheta_{\text{рн}} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 & \vartheta_{\text{рн}} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \end{bmatrix}$$

На основе интегрирования уравнений (7.129)–(7.131) вычисляются управления по формулам (7.133) и (7.134), которые и определяют ОЭИ для задачи управления сближением КА в орбитальной системе координат с одним двигателем. Аналитические выражения определения оптимального релейно-импульсного управления приведены в работе [72].

В результате проведения серии экспериментов были выбраны следующие значения параметров функционала:

$$\beta_1 = 1,5 \text{ м}^{-2}, \beta_2 = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2, \beta_3 = 3,0 \text{ м}^{-2},$$

$$\beta_4 = 4 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2, \beta_5 = 3,0 \text{ м}^{-2},$$

$$\beta_6 = 4 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2, K_{\text{рн1}} = K_{\text{рн2}} = 4,49 \cdot 10^{-6},$$

$$K_{\text{рн3}} = K_{\text{рн4}} = \begin{cases} 0,4 \cdot 10^{-6} & \text{при } t \leq 200 \text{ с,} \\ 0,36 \cdot 10^{-6} & \text{при } t > 200 \text{ с,} \end{cases}$$

$$K_{\text{н1}} = \begin{cases} 0,35 \cdot 10^{-9} & \text{при } t \leq 210 \text{ с,} \\ 0,35 \cdot 10^{-5} & \text{при } 210 < t \leq 550 \text{ с,} \\ 0,155 \cdot 10^{-7} & \text{при } t \leq 550 \text{ с,} \end{cases}$$

$$K_{\text{н2}} = \begin{cases} 0,2 \cdot 10^{-9} & \text{при } t \leq 210 \text{ с,} \\ 1,0 \cdot 10^{-8} & \text{при } 210 \text{ с} < t \leq 550 \text{ с,} \\ 0,2 \cdot 10^{-8} & \text{при } t > 550 \text{ с.} \end{cases}$$

Результаты численного моделирования представлены на рис. 7.13–7.15.

На рис. 7.13 показана сформированная ОЭИ и реализованная циклограмма

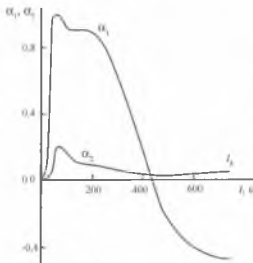


Рис. 7.14. Графики изменения углов α

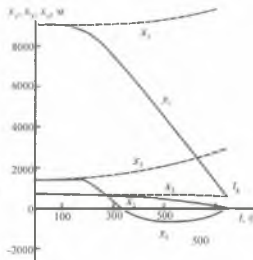


Рис. 7.15. Графики изменения компонент вектора x

включения двигателей; на рис. 7.14 – сформированные алгоритмом графики изменения углов α_1 и α_2 ; на рис. 7.15 – изменения компонент x_1, x_2, x_3 относительной траектории движения активного ПКА в окрестности пассивного.

Состояние, достигнутое к заданному моменту t_k , характеризуется компонентами $x_1 = 631$ м, $x_2 = -4,4$ м·с⁻¹, $x_3 = -48$ м, $x_4 = 1,9$ м·с⁻¹, $x_5 = 26$ м, $x_6 = -10$ м·с⁻¹. Здесь же для сравнения штриховой линией показаны изменения компонент x_1, x_2, x_3 , траектории относительного движения при реализации произвольной циклограммы, представленной на рис. 7.12, и углов $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, используемых как начальная программа при работе алгоритма.

Таким образом, полученные решения поиска оптимального электронного инструктора для управления рассмотренными динамическими операциями управления КА позволяют использовать ОЭИ как

средство обучения и создавать автоматизированные обучающие системы на базе специализированных и комплексных тренажеров. Оптимальная траектория передвижения объекта – это "идеальный образец для подражания", отклонение от которой может использоваться для оценки качества работы операторов.

Использование ОЭИ в перспективе позволит также строить целиком автоматические аналоги управления человека-оператора и применять их при решении других важных задач, связанных с имитацией действий операторов на ранней стадии проектирования ТСО, когда испытания с человеком-оператором еще невозможны, и компьютерной поддержкой операторов в реальных условиях полета. По всей вероятности важность задачи построения ОЭИ будет возрастать при подготовке к управлению летательными аппаратами будущих поколений с оптимальными интегрированными бортовыми комплексами.

Раздел III

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Глава 8

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА И ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

8.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ

Организация взаимосвязанного функционирования тренажеров в тренажерном комплексе осуществляется средствами вычислительной системы (ВС) и общего математического обеспечения (ОМО).

Вычислительная система тренажерного комплекса представляет собой совокупность вычислительных средств, коммуникационного оборудования и программных средств, позволяющих осуществлять математическое моделирование имитируемых объектов, контроль и управление тренировками и т.д.

Архитектура ВС и набор поддерживаемых ею функций в решающей мере определяет эффективность построения тренажерного комплекса и такие его характеристики, как степень гибкости, надежность, возможность модификации и развития и, в конечном счете, предельный срок эксплуатации тренажера в целом.

Опыт отечественного и зарубежного тренажеростроения показывает, что неизбежным следствием неудачного проектирования ВС сложных тренажеров являются завышенные (иногда в десятки раз) требования к вычислительным ресурсам, большая стоимость эксплуатации и технической поддержки, а также проблематичность их модернизации.

Функции и возможности вычислительной системы определяют, прежде всего, степень развитости ее общего математического обеспечения, т.е. программных модулей, управляющих работой прикладных процессов и обслуживающих их аппараты.

Общее математическое обеспечение представляет собой промежуточное программное обеспечение, которое является программной прослойкой между операционной системой и прикладными процессами.

Основная задача ОМО ВС тренажерного комплекса – сконцентрировать в себе те функции, которые являются общими для разных тренажеров и не связаны с конкретными задачами моделируемого объекта. Чем более удачно спроектировано ОМО ВС, тем меньше усилий требуется со стороны разработчиков прикладного программного обеспечения при создании нового тренажера в составе комплекса. Таким образом, наличие развитого ОМО ВС приводит к сокращению сроков разработки новых тренажеров и уменьшению их себестоимости.

В тренажерных комплексах ВС может быть реализована как система коллективного пользования. В таком случае она проектируется именно как принадлежность комплекса, а не входящих в него отдельных тренажеров, и создается заблаговременно. В дальнейшем вычислительные средства и ОМО ВС совместно ис-

пользуются тренажерами комплекса, позволяя организовать как автономную работу нескольких тренажеров, так и их взаимодействие между собой.

На основании опыта создания и эксплуатации тренажерных комплексов, можно сформулировать набор базовых функций, которые должны быть реализованы в вычислительной системе тренажерного комплекса.

Функция *конфигурирования* ВС обеспечивает гибкую реконфигурацию вычислительных ресурсов и программного обеспечения перед началом каждой тренировочной сессии. Функция позволяет обслуживающему персоналу определять, какие тренажеры и ресурсы должны быть задействованы в тренировке, выбирать вычислительные средства, которые будут задействованы для выполнения программных процессов, задавать версию математического обеспечения тренажера для текущей сессии.

В тренажерном комплексе эта функция позволяет:

- использовать вычислительные средства как средства коллективного пользования;
- резервировать ресурсы ВС для повышения надежности системы;
- использовать различные версии программного обеспечения, позволяя, в частности, вести работы над новой конфигурацией тренажерного комплекса без вывода из эксплуатации базовой конфигурации.

Функция *конфигурирования и инициализации системы моделирования* выполняется однократно за тренировочную сессию без участия обучаемого сразу после конфигурирования и инициализации ВС. Управляющая программа загружает прикладные модули, устанавливает исходные значения расчетных параметров, вызывает каждый модуль для его инициализации, настраивает маршруты взаимодействия модулей.

Функция обеспечивает возможность использования одного и того же универсального ОМО ВС с разными наборами

прикладных модулей в разных тренажерах.

Управление режимами работы. Тренажеры имеют набор типовых режимов работы (инициализация, отработка начальных условий, пуск тренировки, стоп тренировки, установка модельного времени и масштаба моделирования, сохранение и восстановление контрольных точек, завершение работы, отладочные режимы). Переход от одного режима к другому в одних случаях осуществляется управляющей программой по собственной циклограмме, а в других – по командам обслуживающего персонала (так называемые, команды управления тренировкой). ОМО ВС обеспечивает синхронное выполнение режимов структурными элементами тренажеров.

Служба реального времени предназначена для синхронного управления работой прикладных модулей в реальном и ускоренном масштабах времени и позволяет компонентам ВС в любой момент получить текущее время моделируемого процесса. Начальная точка отсчета времени задается обслуживающим персоналом.

В многомашинной ВС служба времени решает также задачу синхронизации модельного времени на всех узлах ВС. Синхронизация может производиться либо от внешнего источника меток времени, либо от одного из узлов ВС, обычно от моделирующего компьютера.

Функция *управления моделями системы моделирования* обеспечивает перIODический вызов моделей для вычисления параметров состояния моделируемого объекта на текущий момент модельного времени в основном рабочем режиме "Пуск тренировки". Кроме того, ВС обеспечивает вызов других специфицированных в протоколах точек входа моделей, в зависимости от текущего режима работы.

Организация межмашинного обмена. ОМО ВС многомашинных тренажерных комплексов обеспечивает информационный обмен между узлами ВС. Взаимодействие узлов строится на базе протоколов

межмашинного обмена ВС прозрачным для прикладных процессов образом. Последнее означает, что прикладные процессы ничего не знают о структуре ВС. Доставку информации в соответствии с заданной структурой осуществляет ОМО ВС.

Управление обменом данными между модулями системы моделирования. Выше уже говорилось о том, что модели и форматы ОМО интенсивно обмениваются между собой информацией. ВС должна обеспечивать обмен данными между моделями и форматами в реальном времени, гарантируя актуальность данных на входе модели или формата в каждый момент времени и исключая потери данных.

ВС должна гибко управлять потоками данных с целью исключения загрузки каналов обмена невостребованными данными.

Функция регистрации событий системы моделирования обеспечивает запись действий операторов и инструкторов с сохранением времени и результата их выполнения для дальнейшего анализа хода тренировки и предъявления протокола обучаемому оператору.

Сохранение и восстановление контрольных точек. Контрольная точка – это срез состояния системы моделирования тренажерного комплекса на некоторый момент модельного времени. Контрольные точки сохраняются вычислительной системой (записываются на долговременный носитель памяти, обычно жесткий диск) по инициативе обслуживающего персонала или автоматически через определенные интервалы времени. Восстановление ранее сохраненной контрольной точки позволяет повторно провести участок тренировки, начиная с сохраненного состояния. Контрольные точки используются как в учебных целях (повторение упражнения), так и в целях защиты тренировки от сбоев оборудования.

Функция записи и воспроизведения тренировки обеспечивает демонстрацию обучаемым записанной тренировки или ее отрезка для анализа их действий.

Функция обработки ошибок и исключительных ситуаций обеспечивает выживание системы при сбоях в прикладных модулях, а также локализацию возможных проблем с точностью до функционального элемента и восстановление функционирования при возникновении не критических ошибок.

Функция сбора статистических сведений предоставляет администратору ВС возможность сбора статистических сведений об использовании ресурсов ВС. Статистика включает в себя сведения о потреблении вычислительных ресурсов отдельными системами ВС в различных режимах и характеристики свободных ресурсов ВС.

К технологическим функциям ВС относятся средства отладки модулей системы моделирования (просмотр и изменение значений переменных, регистрация параметров обмена, пошаговая отладка программных модулей, разовые запуски моделей по выбору и т.д.) и специальные режимы тестирования. Отладочные функции предназначены для поддержки процесса разработки и поиска ошибок в системе моделирования. Тестовые средства необходимы для автоматизированной проверки функционирования тренажерного комплекса после проведения регламентных работ, замены оборудования или обновления программного обеспечения.

8.2. АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Вычислительные системы тренажерных комплексов должны строиться на базе унифицированных взаимозаменяемых вычислительных ресурсов. Архитектура ВС комплекса должна обладать высокой гибкостью, возможностью наращивания ресурсов ВС в процессе эксплуатации.

Одной из первых развитых вычислительных систем для тренажерного комплекса можно считать ВС "Ермак-27", на базе которой в 1980-е годы XX века в

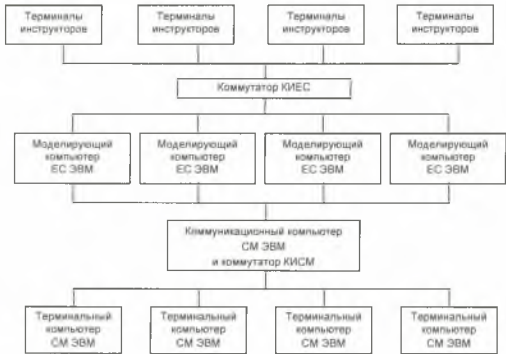


Рис. 8.1. Укрупненная структура ВС тренажерного комплекса ОК "Мир" ("Ермак-27")

РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина был развернут комплекс тренажеров орбитального комплекса "Мир". (Строго говоря, еще раньше в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина был построен тренажерный комплекс "Белладонна" для подготовки экипажей космонавтов по программе ДОС "Салют". Однако этот первый комплекс состоял всего из двух тренажеров. При создании его вычислительной системы были впервые апробированы идеи, результатом развития которых стала ВС "Ермак-27".)

ВС "Ермак-27" была спроектирована с учетом новейших достижений компьютерной индустрии своего времени. Например, в качестве компьютеров верхнего уровня, предназначенных для моделирования объекта и других ресурсоемких расчетов, были выбраны машины серии ЕС ЭВМ. Управление бортовым оборудованием и оборудованием поддерживающих систем (таких как имитаторы визуальной обстановки) осуществлялось с по-

мощью компьютеров СМ-2М. Разумеется, сегодня возможности подобной техники уже никого не интересуют. Однако трехуровневая архитектура ВС "Ермак-27" по-прежнему является интересной и актуальной, а решения, примененные тогда впервые при создании ОМО ВС, легко узнаваемы, например в системном программном обеспечении современного комплекса тренажеров американского сегмента Международной космической станции.

Укрупненная структура ВС "Ермак-27" (тренажерного комплекса ОК "Мир") показана на рис. 8.1.

Четыре функционально эквивалентных моделирующих компьютера ЕС ЭВМ являются средствами коллективного пользования. Любой из них может исполнять вычислительные процессы любого тренажера комплекса. Посредством аппаратного коммутатора КИЕС моделирующие компьютеры соединяются с четырьмя пультами контроля и управления (ПКУ).

Каждый ПКУ содержит от трех до четырех рабочих мест инструкторов и предназначен для оперативного управления тренировкой на одном из тренажеров. Коммутатор КИЭС позволяет любую ЕС ЭВМ оперативно соединить с любым ПКУ.

Таким образом, четыре компьютера верхнего уровня могли обеспечить одновременное проведение до четырех независимых тренировок или совместную работу четырех взаимодействующих тренажеров (из одиннадцати тренажеров тренажерного комплекса).

Терминальные компьютеры (нижний уровень ВС) управляли оборудованием макетов штатных изделий и были привязаны к конкретным тренажерам, поэтому их количество увеличивалось при вводе в эксплуатацию новых тренажеров ОК "Мир". После завершения развертывания комплекса в составе ВС "Ермак-27" эксплуатировалось восемь терминальных компьютеров СМ ЭВМ.

Коммутация данных между ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ осуществляется с помощью двух коммуникационных компьютеров СМ-2М и аппаратного коммутатора КИСМ (средний уровень ВС). Последний позволяет оперативно подключить любую терминальную СМ ЭВМ к любому из двух коммуникационных компьютеров. Собственно коммутация данных выполняется программным обеспечением коммуникационного компьютера.

Заметим, что основная цель включения в архитектуру ВС "Ермак-27" двух коммуникационных компьютеров вместо одного – обеспечение высокой надежности комплекса. В противном случае коммуникационный уровень был бы самым слабым местом ВС, так как выход из строя или выполнение технологических работ на коммуникационном компьютере привели бы к невозможности использования ни одного из тренажеров комплекса.

В период создания ВС "Ермак-27" еще не существовало оборудования популярных сегодня локальных вычислительных сетей, таких как Ethernet. Для созда-

ния цифровых каналов связи между вычислительными средствами ВС использовалось оборудование МВС.

Такая модульная трехуровневая архитектура ВС "Ермак-27" обеспечивала высокую гибкость конфигурирования нескольких тренировочных сессий, "горячее" резервирование вычислительных средств и простоту наращивания комплекса.

Модульный принцип был сохранен и при проектировании программного обеспечения ВС.

Программной единицей ВС "Ермак-27" являлся функциональный процесс. По принадлежности функциональные процессы делились на процессы общего математического обеспечения (ОМО) ВС и процессы специального математического обеспечения (СМО). К ОМО относились процессы универсального назначения, не привязанные к системе моделирования конкретного тренажера. В качестве примера можно привести процессы консоли оператора, коммутатора данных, машинного обмена. В состав специального математического обеспечения (СМО) входили процессы математического моделирования объекта, системы управления тренировкой, управления оборудованием макета.

Функциональные процессы ОМО и СМО были организованы и управлялись одинаково, т.е. вычислительная система не делала предположений о смысловом содержании функционального процесса. Монитор реального времени ВС осуществлял циклический вызов процессов с шагом квантования 100 мс, при этом диспетчеризация осуществлялась с учетом приоритетов процессов.

Обмен информацией между структурными частями одного процесса (например, между моделями систем в процессе моделирования объекта) осуществлялся средствами прикладного процесса. Как правило, для этих целей процесс создает в оперативной памяти информационные зоны. ВС контролирует только обмен

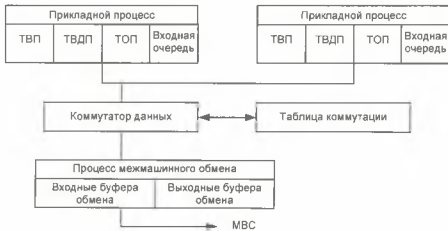


Рис. 8.2. Схема информационного обмена между процессами в ВС тренажерного комплекса "Мир"

информацией между процессами. (Это можно считать платой за универсальность и одним из недостатков архитектуры, так как комплексирование сложных процессов моделирования объекта становилось нетривиальной задачей, не имевшей поддержки со стороны ОМО ВС.) Единицей информационного обмена между процессами являлся параметр обмена.

Параметр обмена представляет собой сообщение длиной до 256 байт, состоящее из заголовка параметра и данных. Заголовок параметра содержит двухбайтный идентификатор параметра, максимальную и текущую длину параметра и до семи шифров процессов – получателей информации. Область данных вычислительной системой не контролируется и определяется протоколами информационного обмена, за которые отвечают разработчики прикладных процессов. Схема информационного обмена между процессами показана на рис. 8.2.

Каждый процесс заводит для своих параметров обмена входные и выходные зоны, где содержатся значения всех параметров. Для каждого параметра имеется только одна зона, которую процесс дол-

жен освободить прежде, чем туда будет записано новое значение параметра. Помимо входных и выходных зон процесс заводит таблицу входных параметров (ТВП) и таблицу выходных параметров (ТВДП), которые содержат список параметров обмена и адреса параметров во входных и выходных зонах соответственно. Когда процесс помечает выходной параметр как готовый для пересылки, монитор передает его коммутатору данных. Коммутатор данных считывает шифры адресатов и осуществляет их поиск в таблицах коммутации, содержащей для каждого шифра адресата соответствующий шифр процесса получателя. Параметр пересылается во входную очередь процесса-получателя. Из входной очереди параметры переписываются во входные зоны получателей, по мере того как прикладной процесс считывает очередную информацию и освобождает входную зону.

Если процесс-получатель размещен на другой ЭВМ, его шифр в таблице коммутации коммутируется на процесс межмашинного обмена. Этот процесс собирает информацию в буфера и пересылает их по каналу МВС аналогичному процессу

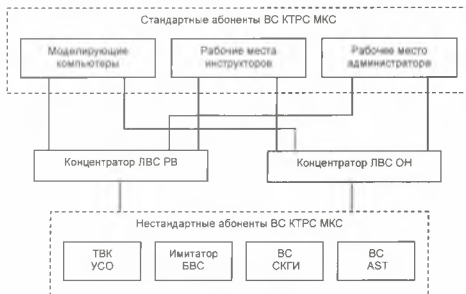


Рис. 8.3. Укрупненная архитектура ВС КТРС МКС

на другой машине, где производится разборка буферов и диспетчеризация параметров с помощью коммутатора данных.

Таким образом, в ВС "Ермак-27" обеспечивалось совместное функционирование множества процессов, распределенных по различным компьютерам и возможно относящихся к разным тренажерам. Тренажеры могли функционировать независимо или взаимодействуя друг с другом. В последнем случае достаточно было предусмотреть обмен параметрами между соответствующими процессами.

ВС "Ермак-27" обеспечила успешную эксплуатацию комплекса тренажерной станции "Мир" в течение всего срока жизни станции (с 1986 г. по январь 2001 г.). Благодаря гибкой модульной архитектуре, был обеспечен поэтапный ввод в эксплуатацию тренажеров орбитальных модулей без длительных перерывов в работе ранее созданных тренажеров.

В период эксплуатации фактически непрерывно проводились модификации

тренажеров в соответствии с постоянными изменениями аппаратуры штатных объектов на орбите. При этом в каждый момент времени тренажеры были готовы к тренировкам благодаря возможностям динамического конфигурирования тренировочных сессий и системе управления тремя версиями программного обеспечения: боевой, проверочной и отладочной.

Интересно, что благодаря гибкой модульной структуре в процессе эксплуатации ВС "Ермак-27" была успешно проведена уникальная операция замены выработавших ресурс моделирующих компьютеров ЕС ЭВМ на более современные мэйнфреймы IBM-390 без модификации программного обеспечения тренажеров и без длительного прекращения их работы.

Дальнейшим развитием идей, реализованных в ВС "Ермак-27", можно считать вычислительную систему, на основе которой в настоящее время в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина эксплуатируется и продолжает развиваться комплекс трена-

жеров Российского сегмента Международной космической станции (ВС КТРС). Учет многолетнего опыта эксплуатации ВС "Ермак-27" и новейших достижений компьютерной науки и техники позволили создать качественно новую вычислительную систему, архитектура которой укрупненно представлена на рис. 8.3.

Современные вычислительные средства и коммуникационное оборудование позволили существенно упростить архитектуру вычислительной системы. Например, существующие коммерческие интеллектуальные сетевые концентраторы позволили исключить из архитектуры ВС коммуникационные компьютеры, а использование дешевой персональной техники вместо графических терминалов инструкторов сделало ненужным существование аппаратуры, аналогичной КИЕС. При этом увеличилась гибкость и надежность ВС.

Открытость ВС КТРС обеспечивает разделением ее вычислительных средств на стандартные и нестандартные абоненты ВС. Критерием разделения является тип ОМО, исполняемый на том или ином узле ВС.

Все стандартные абоненты ВС исполняют одно и то же ядро ОМО и различаются только программами СМО и вариантами пользовательского интерфейса в зависимости от назначения вычислительного средства.

Экземпляры ядра ОМО стандартных узлов ВС умеют автоматически "договариваться" друг с другом, обеспечивая синхронизацию их работы и гибко коммутируя потоки данных между узлами ВС. Допускается горячее подключение дополнительных узлов ВС в процессе тренировки или отключение невостребованных вычислительных средств. Настройка модулей СМО на конкретную конфигурацию ВС не требуется, так что одни и те же модули СМО могут работать в различных ВС, например, в больших ВС комплексных тренажеров и в малых ВС учебных

классов. Это один из механизмов обеспечения масштабируемости ВС.

Нестандартные абоненты ВС могут представлять собой отдельные вычислительные средства или локальные вычислительные системы с произвольным ОМО. Единственным требованием для них является поддержка универсального протокола ВС КТРС для нестандартных абонентов. Этот протокол описывает только общую дисциплину межмашинного обмена, конкретный состав данных обмена может быть произвольным.

Поддержка взаимодействия с нестандартными абонентами со стороны ОМО ВС КТРС построена по двухуровневой схеме. Ядро ОМО автоматически обеспечивает механизмы синхронизации и транспорт данных, а информационное наполнение потоков данных осуществляется модулями СМО.

Вычислительные средства ВС КТРС объединены двумя вычислительными сетями: ЛВС реального времени (ЛВС РВ) и ЛВС общего назначения (ЛВС ОН). Первая представляет собой 100-мегабитную оптоволоконную сеть FDDI и предназначена для обмена данными реального времени в процессе тренировки. Вторая сеть построена на базе аппаратуры Ethernet и предназначена преимущественно для обмена технологическими данными.

Вместе с тем, ОМО ВС не чувствительно к конкретной среде передачи данных и позволяет подключать некоторые или даже все узлы исключительно через ЛВС ОН. Такой подход полезен, например, для малых ВС обучающихся компьютерных классов. Это второй механизм обеспечения масштабируемости ВС.

Группу нестандартных абонентов ВС КТРС в настоящее время образуют четыре локальные вычислительные системы с собственной архитектурой. Например, терминальный вычислительный комплекс устройств сопряжения с объектом (ТВК УСО), предназначенный для управления оборудованием УТМ орбитальных моду-

лей, состоит из четырех промышленных (крейтовых) компьютеров на базе шины VME и одного персонального компьютера рабочего места инженера РМО.

Имитатор БВС предназначен для моделирования работы бортовой вычислительной системы МКС и состоит из двух промышленных (крейтовых) компьютеров и двух рабочих станций Sup.

Две другие внешние вычислительные системы – это комплекс системы компьютерной генерации изображений (СКГИ), предназначенный для формирования сюжетов в иллюминаторах и приборах наблюдения, и вычислительная система тренажера американского сегмента МКС (AST), предоставленного NASA.

Успешная интеграция внешних вычислительных систем российских и иностранных разработчиков в ВС КТРС подтверждает эффективность ее открытой архитектуры. Отметим также, что архитектура ВС КТРС легко обеспечивает наращивание ее ресурсов по мере развития программы МКС.

Структура программного обеспечения ВС КТРС является результатом дальнейшего развития принципа модульности и приближения основных структурных элементов СМО к предметной области.

Универсальные функциональные процессы ВС "Ермак-27" заменены двумя типами прикладных модулей СМО – моделями и форматами. Модели представляют собой математическое описание бортовых систем моделируемого объекта, а форматы предоставляют пользователю графический интерфейс к моделям систем.

Каждая модель и каждый формат разрабатываются как независимые модули и исполняются под управлением ОМО ВС КТРС. Они могут размещаться на любых стандартных абонентах ВС, при этом ОМО автоматически и гибко управляет потоками данных между абонентами. Таким образом, ВС КТРС является распределенной вычислительной системой.

8.3. ТРЕНАЖНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОБЛОЧКА ТРИО

ТРИО представляет собой совокупность инструментальных средств прикладного программирования и многоаппаратной исполнительной оболочки мягкого реального времени, предназначенных для создания систем моделирования объектов [17, 18]. Помимо ВС КТРС, рассмотренной в предыдущем параграфе, ТРИО успешно использовалась при создании комплекса средств подготовки моряков-подводников, автомобильного тренажера, учебных классов и компьютерных тренажеров.

Укрупненная структура ТРИО приведена на рис. 8.4.

Комплекс программ ТРИО включает в себя два основных пакета:

- технологическое программное обеспечение поддержки процесса проектирования системы моделирования;
- исполнительная оболочка реального времени.

Технологическое программное обеспечение предназначено для ведения электронной версии описания моделирующей системы в объеме, достаточном для автоматизированной организации вычислительного процесса, в предположении, что каждая модель представляется как "черный ящик" с известными входными и выходными данными (объект).

Исполнительная оболочка предназначена, прежде всего, для организации выполнения моделей систем в реальном времени и обеспечения обмена данными между ними без участия самих моделей. Она имеет возможность автоматически настраиваться на конкретную моделирующую систему по ее электронному описанию. Она также предоставляет различные сервисные функции по управлению процессом моделирования, включая средства отладки прикладных модулей.



Рис. 8.4. Укрупненная структура ТРИО

Эти два программных пакета тесно связаны друг с другом в том смысле, что модели систем, созданные с применением технологического программного обеспечения, автоматически оказываются готовыми к работе под управлением исполнительной оболочки. В свою очередь, исполнительная оболочка работает только с теми моделями систем, которые разработаны с применением технологического программного обеспечения ТРИО, что позволяет минимизировать работу по настройке и исключить большое количество ошибок программирования.

8.3.1. Исполнительная оболочка ТРИО

Исполнительная оболочка построена в виде двух отдельных компонентов: ядра

ТРИО и управляющей программы интерфейса пользователя.

Ядро ТРИО обеспечивает функции управления выполнением моделей систем, обмена данными между прикладными модулями, управления режимами вычислительной системы.

Для каждого узла вычислительной сети ядро ТРИО функционально идентично. Это обеспечивает возможности по взаимной автоматической настройке узлов вычислительной системы и необходимую для различных прикладных задач гибкость.

Управляющая программа интерфейса пользователя обеспечивает работу пользователя с ТРИО и управление форматами пользователя.

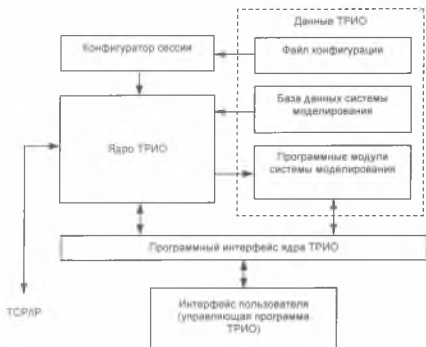


Рис. 8.5. Структура программного обеспечения узла вычислительной системы

Отделение ядра ТРИО от интерфейса пользователя имеет важную практическую цель. Реализация ядра ТРИО в качестве отдельного программного модуля позволяет разработать различные варианты интерфейсов пользователя, работающие с одним и тем же ядром. Кроме того, графические интерфейсы – это чрезвычайно ресурсоемкие задачи, конкурирующие в своих требованиях к вычислительным ресурсам с задачами реального времени. Таким образом, ядро ТРИО выполняет всю работу по управлению процессом моделирования, но оно не имеет встроенного интерфейса пользователя.

Структура программного обеспечения каждого узла ВС, работающего под управлением ТРИО, идентична и приведена на рис. 8.5.

Ядро ТРИО реализует следующие функции:

- управление моделями среды и технических систем в реальном и ускоренном масштабах времени;
- поддержка различных тактов моделирования для разных моделей систем;
- поддержка распределенного моделирования, включая выполнение разных моделей на разных узлах вычислительной системы и их синхронизацию;
- прозрачная для прикладных модулей доставка данных в пределах вычислительной системы;
- поддержка двух типов данных системы моделирования: расчетных параметров текущего состояния моделей систем и событий (команд системы моделирования);
- поддержка сетевого просмотра и модификации переменных в режимах отладки;
- управление режимами вычислительной системы в многомашинном комплексе,



Рис. 8.6. Структура управляющей программы ТРИО

включая управление моделями в каждом из режимов;

- сохранение и восстановление контрольных точек;
- регистрация событий системы моделирования;
- поддержка взаимодействия с нестандартными абонентами вычислительной системы, реализованными на основе собственных сред исполнения;
- взаимодействие с базой данных системы моделирования;
- поддержка различных вычислительных платформ.

Ядро ТРИО поддерживает два способа обмена данными между прикладными модулями: общая область памяти и команды (события).

Общая область памяти всегда содержит последние расчетные значения пара-

метров моделирования. В многомашинном комплексе ТРИО автоматически поддерживает синхронизацию экземпляров общих областей на всех стандартных узлах ВС.

Для команд поддерживается буферизация, что исключает потерю необработанных событий. Каждая команда имеет атрибут модельного времени, соответствующего моменту, в который команда должна быть выполнена. Таким образом, команды являются удобным средством организации временных циклограмм.

Ядро ТРИО может настраиваться на разные системы моделирования в процессе своей инициализации. Необходимая для настройки информация берется из базы данных системы моделирования, которая создается в процессе разработки СМО.

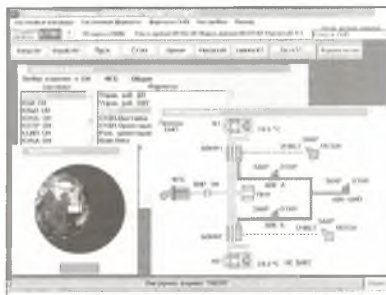


Рис. 8.7. Общий вид главного окна управляющей программы с открытыми прикладными форматами

Помимо ядра, ТРИО включает в себя базовый вариант управляющей программы с графическим интерфейсом пользователя, предназначенный главным образом для обеспечения процесса разработки и отладки прикладных модулей системы моделирования. Структура управляющей программы ТРИО представлена на рис. 8.6.

Управляющая программа инициирует загрузку и начало работы ядра ТРИО, завершение работы, обмен данными с ядром, а также осуществляет управление работой форматов пользователя.

Графический интерфейс управляющей программы спроектирован по принципу единого рабочего поля, занимающего весь экран монитора. Главное окно содержит все типовые элементы пользовательского интерфейса, включая заголовок, главное меню, панели состояния, кнопки быстрого ввода команд и навигации, строку сообщений (рис. 8.7). Центральное поле предназначено для размещения форматов.

Главное окно обеспечивает пользователю следующие функции:

- управление режимами вычислительной системы и контроль текущего режима;
 - управление и отображение времени моделирования и масштаба моделирования;
 - аварийную сигнализацию при нарушении целостности вычислительной системы;
 - навигацию по форматам пользователя;
 - вывод сообщений в строку сообщений;
 - доступ к отладочным средствам.
- В составе управляющей программы реализован ряд встроенных типовых форматов, которые могут быть полезными в любой системе моделирования. К ним относятся форматы:
- управления модельным временем;
 - ввода команд системы моделирования;
 - монитора событий системы моделирования;
 - работы с контрольными точками;
 - просмотра и изменения значений переменных системы моделирования.

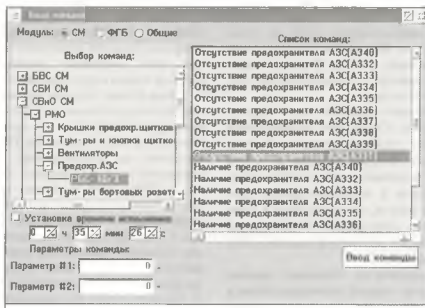


Рис. 8.8. Формат ввода команд системы моделирования

Например, на рис. 8.8 представлен универсальный формат ввода команд системы моделирования.

Содержимое этого формата существенно зависит от конкретной системы моделирования, однако вся необходимая информация содержится в базе данных системы моделирования, так что формат умеет настраиваться на систему моделирования при загрузке управляющей программы. Пользователь получает удобный универсальный инструмент для отладки блоков обработки команд.

Левая панель формата предоставляет возможность удобной навигации по системам, группам и подгруппам команд, а в правой панели высвечивается список существующих в выбранном разделе команд.

Процесс отработки команд регистрируется монитором событий ядра ТРИО. Результаты регистрации могут быть просмотрены на соответствующем формате.

8.3.2. Технологическое программное обеспечение ТРИО

Технологическое программное обеспечение предназначено для поддержки разработки модулей системы моделирования. В его состав входят средства ведения базы данных системы моделирования и автоматизированного построения скелетов исходных текстов прикладных модулей (моделей и форматов).

Основная цель при создании программного инструментария заключалась в формализации и навязывании прикладному программисту грамотного порядка разработки системы моделирования и ее модулей.

Базовым требованием со стороны технологического программного обеспечения к проектированию системы моделирования является требование начать разработку с создания ее структурно-функциональной схемы. Многопользова-

тельская система управления базой данных системы моделирования объекта (СУБД СМО) позволяет перевести структурно-функциональную схему в электронный вид. База данных содержит пять типов записей: модели, форматы, переменные, команды и информационные связи между модулями.

На основе созданной таким образом базы данных СУБД СМО автоматически генерирует каркасы исходных текстов прикладных модулей на языке C++. Эти каркасы включают в себя полное описание входных и выходных данных прикладного модуля, его точек входа в соответствии с протоколами ТРИО, блоков обработки для зарегистрированных в базе данных команд.

Автоматически созданные каркасы прикладных модулей полностью готовы к компиляции и исполнению под управлением ТРИО, включая поддержку информационного обмена между модулями.

Дальнейший процесс разработки прикладного модуля состоит в наполнении автоматически созданных блоков обработки конкретными расчетами. Программист имеет возможность поэтапно наращивать функциональность разрабатываемого модуля так, что на каждом этапе разработки модуль может быть запущен под управлением ТРИО. Встроенные в ТРИО средства отладки предоставляют возможность сетевого просмотра и модификации значений переменных, выдачи команд системы моделирования, контроля событий. Каждый модуль может разрабатываться и отлаживаться независимо от других модулей.

При необходимости корректировки структурно-функциональной схемы системы моделирования требуется снова пройти через СУБД СМО и повторную генерацию каркасов прикладных модулей, при этом введенные программистом вручную строки кода сохраняются.

База данных системы моделирования используется не только на этапе создания прикладных модулей, но и в процессе их выполнения под управлением ТРИО (для настройки на конфигурацию СМО и управления потоками данных). Таким образом, ТРИО может исполнять только те прикладные модули, которые созданы с использованием предлагаемой технологии, т.е. прикладной программист вынужден соблюдать навязанный порядок разработки. Это ограничение, очевидно, затрудняющее импорт прикладных модулей из внешних систем моделирования, имеет много положительных следствий. В частности:

- в десятки раз сокращается трудоемкость разработки и отладки системы моделирования;
- сводится к минимуму работа по отладке взаимодействия между прикладными модулями;
- упрощается сопровождение и модификация системы моделирования, поскольку все модули одинаково и детально структурированы;
- снижаются требования к квалификации прикладных программистов;
- появляется возможность полностью автоматической настройки ОМО ВС на различные системы моделирования, что приводит к высокой гибкости и масштабируемости ВС.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СОПРЯЖЕНИЯ С ОБЪЕКТОМ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ

9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ

Одной из основных составных частей современных тренажеров динамических объектов является комплекс программных и аппаратных средств, обеспечивающий сопряжение вычислительной моделирующей системы с приборным оборудованием тренажера.

В отечественной практике для обозначения подобных комплексов часто используется аббревиатура – УСО (устройство сопряжения с объектом), которой, несмотря на устаревший и упрощенный смысл по отношению к функциональному содержанию современных комплексов сопряжения, целесообразно придерживаться.

Характерными особенностями задач сопряжения в современных тренажерах являются:

- значительный объем сигналов – от нескольких сотен до нескольких тысяч единиц;
- широкий спектр технических характеристик сигналов – от простого аналогового и цифрового ввода и вывода до сопряжения сложных интерфейсов;
- территориально распределенный характер оборудования тренажеров;
- широкий спектр задач первичной обработки информации, выполняемый средствами УСО – от маршрутизации квантов информации до задач форматирования, интерполяции и моделирования элементов бортовой логики.

Концептуальный образ комплекса сопряжения для решения подобных задач можно сформулировать в следующем виде:

– модульность – для обеспечения типового и экономичного подхода при обработке большого числа сигналов;

– блочно-магистральный принцип – для унифицированного и быстродействующего обслуживания, а также для компактного размещения большого числа модулей УСО;

– наличие программируемых логических контроллеров (PLC) – для выполнения задач преобразования информации и управления модулями УСО;

– возможность применения инструментальных средств для разработки специального (СПО) и тестового (ТПО) программного обеспечения, а также для отладки программно-аппаратных средств УСО.

В мировой и отечественной практике задачи создания УСО такого класса решаются применением магистрально-модульных микропроцессорных систем (МММС).

Формирование структуры УСО, выбор технологии ее реализации полностью определяется составом и техническими характеристиками объектов сопряжения с изделием.

9.2. АНАЛИЗ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ОБЪЕКТА В ЧАСТИ СОПРЯЖЕНИЯ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Данный анализ выполнен в ограниченном объеме и не может претендовать на исчерпывающую полноту, однако является достаточным для определения глобальной структуры УСО, направления технологии его создания и формирования требований к исходным данным.

Комплекс приборов и бортовых систем реального объекта содержит сложную структуру бортового оборудования, тесно взаимодействующего между собой по каналам информационного обмена при выполнении задач управления. Основными элементами реального объекта являются:

- система электроснабжения;
- система управления общим оборудованием реального объекта;
- пульты управления общим оборудованием;
- органы основного управления реальным объектом;
- подъемные устройства;
- постоянные и сменные модули многофункционального интегрированного радиоэлектронного комплекса;
- системы отображения информации (СОИ) на рабочих местах операторов;
- органы управления двигателями;
- система табло аварийной и уведомляющей сигнализации;
- системы речевого оповещения;
- светотехническое оборудование;
- бортовая автоматизированная система контроля и регистрации;
- бортовой автоматизированный комплекс связи.

Анализ указанного оборудования с точки зрения сопряжения с вычислительной моделирующей системой позволяет определить порядок, основные параметры и средства информационного взаимодействия. Средствами информационного взаимодействия являются электрические сигналы ввода и вывода информации, которые по информативным параметрам подразделяются на аналоговые (непрерывные), принимающие любые значения на некотором интервале и являющиеся непрерывной функцией времени, и дискретные, принимающие конечное множество значений. Дискретные сигналы, в свою очередь, могут быть двоичными потенциалами низкого и высокого уровней и цифровыми – числовые значения из некоторой области значений, символы алфавита и т.д.

Таким образом, основные группы сигналов информационного взаимодействия для сопряжения указанного оборудования будут следующими: сигналы аналогового ввода, сигналы дискретного ввода, сигналы аналогового вывода, сигналы дискретного вывода, каналы информационного обмена.

К каналам информационного обмена относятся мультиплексные каналы информационного обмена (МКИО), последовательные каналы обмена разовыми командами, каналы консольных терминалов (интерфейс RS-232) и т.л.

Сигналы аналогового ввода могут быть сформированы ручками, рычагом управления, педалями управления на рабочем месте оператора с помощью датчиков, преобразующих механические перемещения в пропорциональные электрические сигналы.

В качестве датчиков здесь могут быть применены потенциометрические преобразователи измеряемой физической величины – угла поворота в омическое сопротивление, а затем, при включении в электрическую цепь, в унифицированные сигналы постоянного напряжения или тока: $(0 \pm 5)V$, $(0 \pm 10)V$, $\pm 5 V$, $\pm 10 V$, от 0 до 20 мА, от 4 до 20 мА. Для измерения параметров угла поворота в качестве датчика могут быть использованы вращающиеся трансформаторы.

Самую многочисленную группу составляют сигналы дискретного ввода. С помощью этих сигналов осуществляется ввод информации о положении органов управления на пультах систем, блоках включения и защиты, пультах подготовки исходных данных, специальных пультах управления и т.д. Органами управления на этом оборудовании являются тумблеры, двух- и многопозиционные переключатели, кнопки, клавиши и др., формирующие сигналы, представленные уровнями напряжения и состоянием контактов "замкнуто-разомкнуто". По уровням дискрети-

зации напряжения это сигналы уровня ± 27 В и ТТЛ-уровня (логический "0" соответствует напряжению от 0 до 0,4 В, а "1" – от 2,5 до 5 В).

Значительную группу составляют сигналы УСО, предназначенные для управления СОИ на рабочих местах операторов приборами, световыми табло, светодиодными и знаковосинтезирующими индикаторами на путях управления систем, а также для управления системами речевого оповещения и аварийной сигнализации.

Непосредственное отображение на приборах и индикаторах состояния реального объекта и результатов выполнения задач управления осуществляется с помощью сигналов аналогового и дискретного вывода, формируемых соответствующими техническими средствами УСО.

Значения отображаемых параметров информационной модели поступают в УСО из вычислительной моделирующей системы в цифровой форме. Информация для отображения остановки на некоторых приборах, таких например, как тахометр несущих винтов, планово-навигационный прибор, авиагоризонт, указатель скорости и радиовысотомер, имеет характер непрерывной функции времени и должна быть сформирована в аналоговой форме. В УСО должно быть осуществлено непрерывное во времени преобразование цифровых значений этих функций в аналоговые сигналы напряжения или тока с последующей их выдачей на указанные приборы. В случае, если эти приборы будут иметь нестандартные характеристики входных цепей, следует предусмотреть разработку схем согласования или усиления, обеспечивающих приведение сигналов к унифицированным электрическим параметрам.

Сигналы дискретного вывода обеспечивают функцию цифрового вывода на приборы с цифровым отображением информации. При этом дискретные сигналы выходных цифровых данных могут ис-

пользоваться либо каждый отдельно для индивидуального управления отдельными параметрами объекта (световые табло и светодиодные индикаторы), либо сгруппированными в кодовые комбинации (знакосинтезирующие и семисегментные индикаторы). Параметры выходных сигналов дискретного вывода определяются значением коммутируемой мощности и скоростью переключения (рабочей частотой). Для обеспечения дискретного вывода необходимы сигналы, имеющие ТТЛ-уровни и сигналы с уровнями напряжения ± 27 В при значениях тока от десятков до сотен миллиампер и рабочей частоте, составляющей десятки килогерц.

Все средства управления реальным объектом – многофункциональные экраны индикаторы (МФИ), образующие СОИ каждого рабочего места, многофункциональные пульта управления обычно объединены в многоуровневую распределенную информационно-управляющую систему.

Многоуровневая организация определяется необходимостью распределения задач по уровням обработки информации, каждый из которых характеризуется различной степенью обобщения информации. Взаимодействие бортовых систем на каждом уровне и в составе бортового комплекса в целом осуществляется с помощью специальных средств информационного обмена. К таким средствам относятся: мультиплексные каналы информационного обмена (МКИО), последовательные каналы обмена разовыми командами, каналы консольных терминалов, соответствующие международному интерфейсу RS-232.

Проведенный анализ бортовых систем и оборудования с точки зрения их сопряжения с вычислительной системой позволяет определить глобальный состав и структуру технических средств УСО. Такой комплекс должен включать в себя подсистемы аналогового ввода, аналогового вывода, подсистему дискретного

ввода-вывода и связи по каналам информационного обмена.

Кроме того, важной составной частью УСО является кабельная сеть УСО, обеспечивающая связь объектов сопряжения и модулей УСО. Широкий диапазон характеристик источников первичной информации и органов управления и индикации в рабочем месте оператора, различная длина линий связи с УСО, наличие помех различного вида определяет выбор проводных средств – экранированные провода, ленточные и круглые кабели, высокочастотные коаксиальные кабели, сигнальные кабели с витыми парами.

Наиболее сложной, с точки зрения технической реализации, является подсистема аналогового ввода. В ее состав входят входные фильтры, аналоговые мультиплексоры, измерительные усилители и преобразователи, аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Измерительные усилители применяются в тех случаях, если сигнал на выходе датчика имеет параметры, не соответствующие стандартным и неудобные для дальнейшей передачи и обработки. Измерительный преобразователь осуществляет амплитудное преобразование аналогового сигнала с целью согласования диапазонов его изменения с диапазонами унифицированных сигналов аналого-цифрового преобразования. Уровни напряжений унифицированных сигналов соответствуют следующим значениям: от 0 до 1 В, от 0 до 5 В, от 0 до 10 В, ± 1 В, ± 5 В, ± 10 В. Уровни токовых унифицированных сигналов: от 0 до 20 мА, от 4 до 20 мА.

Входные фильтры удаляют из сигнала нежелательные низкочастотные и высокочастотные составляющие. Отфильтрованный таким образом сигнал подается на вход аналогового мультиплексора (АМ).

АМ поочередно подключает аналоговые сигналы с каждого своего отдельного входа к измерительному усилителю, с выхода которого сигнал поступает на АЦП. Применение АМ позволяет исполь-

зовать один АЦП для многих входных аналоговых сигналов в режиме разделения времени, экономя, таким образом, дорогостоящее оборудование.

Измерительный усилитель, как правило, с перестраиваемым коэффициентом усиления, обеспечивает усиление малых входных сигналов и измерение в дифференциальном режиме, если АМ включен по схеме с дифференциальным входом, а также в некоторых случаях – гальваническое разделение аналоговых и цифровых цепей.

АЦП преобразуют уровень напряжения на входе в соответствующую цифровую величину. Далее цифровые данные через интерфейсные схемы выдаются, как правило, через системную магистраль в PLC УСО.

В настоящее время фирмами-изготовителями серийно выпускаются в конструктивно законченном виде устройства аналогового ввода, содержащие в себе все основные элементы из рассмотренной выше структуры аналогового ввода: входной фильтр, аналоговый мультиплексор, измерительный усилитель, аналого-цифровой преобразователь. В большинстве случаев конструктивы представляют собой одноплатные вставные модули.

Проектирование подсистемы аналогового ввода потребует тщательной проработки всех элементов схемы сопряжения, включая заземление, экранирование, исполнение и прокладку кабельной сети, надежность контактных соединений для обеспечения требуемой точности преобразования и исключения влияния помех.

Подсистемой аналогового вывода осуществляется выдача на объект управления аналоговых сигналов в виде напряжений или токов, изменяющихся во времени по заданному закону. Преобразование цифровых выходных данных в аналоговый сигнал выполняется с помощью специальных устройств – цифроаналоговых преобразователей (ЦАП).

Существуют различные конфигурации подсистем аналогового вывода, однако наибольшее распространение получили подсистемы с использованием ЦАП и выходного усилителя в каждом канале аналогового вывода. Выходной усилитель служит для гальванического разделения выходных цепей и усиления мощности выходного сигнала. Такое построение подсистемы обеспечивает высокое быстродействие и точность при приемлемой стоимости. Определенные проблемы могут возникнуть при необходимости сформировать выходные аналоговые сигналы, имеющие сложную форму или достаточно высокую скорость изменения (частоту). В этих случаях может потребоваться включить в состав подсистемы специальные технические средства обработки данных для формирования и распределения по каналам аналогового вывода цифровых значений выходных сигналов в соответствии с требуемым законом преобразования в каждый момент времени.

Серийно выпускаемые устройства аналогового вывода обычно содержат четыре и более каналов аналогового вывода с 12-разрядными кодами преобразуемых данных и выходными аналоговыми сигналами в виде напряжения или тока.

При проектировании подсистемы аналогового вывода также необходимо принять специальные меры защиты передаваемых сигналов от помех.

Особенностью построения подсистемы дискретного ввода-вывода является наличие большого количества линий связи, обеспечивающих обмен дискретными сигналами. Это требует проработки схем подключения и вопросов проектирования, изготовления и прокладки кабельной сети. Также необходимо в полной мере использовать принцип многоканальности при выборе технических средств сопряжения.

Основной функцией дискретного ввода является обнаружение одиночных и подсчет многократно повторяющихся событий. Эти функции требуют наличия

схемы нормализации и восприятия сигнала, счетчика, таймера и регистра временного хранения данных. Схема нормализации и восприятия сигнала представляет собой пороговое устройство, уровень выходного сигнала которого соответствует логической "1", если входное напряжение превышает заданное значение. В противном случае выходной сигнал соответствует логическому "0". Для реализации конкретной подсистемы дискретного ввода-вывода необходимо использовать устройство дискретного ввода, обеспечивающие определение состояния или изменения состояния входных сигналов, имеющих уровни напряжения ± 27 В и уровни ± 5 В, а также подсчет числа импульсов и определение длительности импульсов входных сигналов.

Основная функция дискретного вывода – функция ключа. Такой ключ может управлять внутренним источником напряжения или тока подсистемы с целью передачи в нагрузку сигнала в виде уровня напряжения или тока.

Ключ дискретного вывода может управлять также внешним источником напряжения или тока и таким образом управлять подключенным к нему внешним оборудованием. Существуют несколько типов ключей для высокоскоростной коммутации нагрузки малой, средней и большой мощности. Поскольку управление некоторыми приборами и оборудованием объекта может потребовать формирования импульсных последовательностей и импульсов различной длительности, должна быть предусмотрена возможность реализации такого управления с помощью программных и аппаратных средств подсистемы дискретного ввода-вывода.

В качестве выходных формирователей в устройствах дискретного вывода для управления сигналами средней и большой мощности, постоянного и переменного тока при относительно низком быстродействии часто используют реле.

Для реализации дискретного вывода необходимы устройства, обеспечивающие формирование импульсных последовательностей и имеющие уровни выходных сигналов ± 27 В, выходные сигналы ТТЛ-уровней и релейно-контактные формирователи выходных сигналов.

В настоящее время различными фирмами – производителями средств сопряжения выпускаются модули дискретного ввода и дискретного вывода с требуемыми характеристиками в широком ассортименте. Типовое число каналов дискретного ввода или вывода составляет 8, 12, 16 или 32 в зависимости от модификации.

Подсистема связи по каналам информационного обмена должна обеспечивать сопряжение по стандартным интерфейсам информационного обмена как с комплексом систем реального объекта и бортового оборудования, так и с вычислительной моделирующей системой.

К каналам информационного обмена комплекса систем реального объекта и бортового оборудования относятся мультиплексные каналы информационного обмена (МКИО), последовательные каналы обмена разовыми командами и каналы консольного терминала (интерфейс RS-232). Для сопряжения по этим каналам подсистема УСО должна содержать комплекс программных и аппаратных средств сопряжения. В настоящее время ряд зарубежных фирм-производителей производят и поставляют технические средства сопряжения с интерфейсами MIL-STD-1553, ARINC-429, RS-232.

В заключение проведенного анализа сформулируем общие требования к исходным данным, необходимым на этапе технического проектирования УСО.

При проектировании комплексов УСО важными характеристиками, с точки зрения ввода информации, следует считать:

- количество и форму представления входных сигналов (аналоговых и дискретных);
- рабочие диапазоны сигналов;
- точность преобразования аналоговых входных сигналов в цифровую форму;
- скорость изменения измеряемых величин (частота сигналов);
- формат представления и структура вводимой информации для последующей передачи в вычислительную моделирующую систему.

Для вывода информационных и управляющих сигналов УСО на объект управления необходимо знать:

- количество и форму представления выходных сигналов;
- рабочие диапазоны и электрические параметры сигналов;
- точность цифроаналогового преобразования.

Для вывода на исполнительные устройства объекта сигналов в аналоговом виде важны их форма и скорость изменения (частота), а также алгоритмы формирования отдельных специальных сигналов управления.

Для выполнения технического и рабочего проектирования УСО заказчик должен предоставить разработчику следующие исходные данные по бортовому оборудованию:

- полный перечень бортового оборудования;
- электрические характеристики входных и выходных цепей электрооборудования борта;
- полное описание протоколов имеющихся в штатном изделии интерфейсных каналов, либо ссылки на стандарты и ГОСТы, которым они соответствуют;
- описание кинематической схемы органов управления и индикации для неэлектрического оборудования, используемого в тренажере;
- описание внутренней логики оборудования, применяемого в тренажерном исполнении без встроенного эмулятора;

– конструкторскую документацию на бортовое оборудование, в которое необходимо встраивать программно-аппаратные средства имитации.

9.3. ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ И НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УСО

К наиболее известным на настоящее время МММС относятся следующие системы:

– КАМАК (международные стандарты IEC-516, IEEE-583) – применяется преимущественно в странах Европы и в России в области автоматизации научных экспериментов и управления технологическим оборудованием;

– OMRON-MMMС японского концерна OMRON, используемая в странах Европы, Азии и России на предприятиях машиностроительной и металлургической промышленности;

– УСО IBM – системы УСО, выпускаемые различными фирмами Европы, Азии, Канады в стандарте IBM PC;

– Micro PC – промышленные комплексы УСО международного стандарта ISO-9001 IBM-подобной архитектуры для промышленных условий эксплуатации;

– VME (международный стандарт IEEE 1014) – наиболее распространенные в настоящее время МММС, ориентированные как на использование в промышленных технологиях, так и в научных экспериментах и сложных обучающих системах.

МММС в стандарте КАМАК является наиболее распространенной в России и СНГ технологией, однако к настоящему времени очевидными стали ее недостатки:

– устаревшая системотехника и элементная база (разработки 15–20-летней давности);

– ограниченные возможности магистралей по быстродействию – до 1МГц, а, следовательно, неперспективность в связи с постоянно растущим быстродействием

микропроцессорной техники (20...40 МГц и выше);

– высокая материало- и энергоемкость по сравнению с аналогами типа OMRON, VME.

УСО фирмы OMRON разрабатывается с использованием высокоэкономичной элементной базы на основе КМОП-технологии и предназначено для автоматизации отдельных технологических объектов, производственных цехов, участков и заводов. Системотехника УСО позволяет строить иерархические системы сбора, обработки, хранения информации и выдачи управляющих воздействий. В состав модулей входят адаптеры подключения к ПЭВМ типа IBM и локальным сетям стандарта SYSMAC NET на основе волоконно-оптических линий.

Номенклатура модулей УСО, датчиков, регуляторов и т.д. содержит около 100000 наименований. Проектированием систем, изготовлением технических средств, монтажом и наладкой занимаются предприятия OMRON с 13 дочерними фирмами в различных регионах мира, на которых занято около 19000 человек.

Несмотря на развитую во всем мире инфраструктуру OMRON, применение данной технологии затруднено следующими ее особенностями:

– сравнительно невысокое быстродействие модулей УСО (единицы – десятки – сотни миллисекунд), ориентированное на сравнительно медленные промышленные технологические процессы;

– закрытая архитектура, не позволяющая системным интеграторам осуществлять оперативную модификацию ее структуры, номенклатуры модулей УСО и программного обеспечения без привлечения разработчика и изготовителя.

Последний аспект в настоящее время становится особенно актуальным в связи с переориентацией мирового рынка на применение МММС, разрабатываемых и изготавливаемых по концепции COTS

(Commercial of-the-shelf), т.е. "готовых к применению модулей коммерческого исполнения", допускающих самостоятельное, без помощи разработчика и изготовителя, применение в своих изделиях.

Рассмотрим более подробно МММС, нашедшие в настоящее время наибольшее распространение на мировом рынке УСО и удовлетворяющие концепции COTS.

Преобладание на мировом рынке вычислительной техники типа IBM вызывает их широкое применение в системах автоматизированного управления, что в свою очередь способствует развитию следующих основных тенденций в создании УСО:

- многофункциональные модули ввода-вывода аналоговой и/или дискретной информации, устанавливаемые на mother-board компьютеров IBM;

- комплексы УСО, размещаемые в боксах расширения шины IBM PC.

Раньше других и наибольшее распространение получили модули УСО, устанавливаемые в компьютерах на свободные слоты системной шины, однако малое число свободных слотов, от 2 до 5 в различных компьютерах, накладывает ограничение на число обрабатываемых сигналов.

Наибольшей известностью среди модулей данного направления пользуются устройства L-серии, выпускаемые фирмой L-Card (США), имеющей представительство в России (L-Card Ltd, г.Москва).

Характеристики ряда основных модулей приведены в табл. 9.1

Как видно из таблицы, набор модулей обеспечивает преобразование довольно широкого спектра аналоговых сигналов по разрядности, воздействию, числу каналов, наличию одно- и биполярных входов, гальванической развязки, а также по количеству входных и выходных цифровых цепей. Обращает на себя внимание относительно низкая цена модулей.

В комплект поставки модулей входит базовое программное обеспечение, содержащее:

- руководство пользователя;

- исходные тесты на ASMB функций ввода-вывода;

- управляющая программа L-card версии 3.1;

- программа инициализации платы;
- программа тестирования ПДП-каналов.

Дополнительно поставляемое программное обеспечение:

- 1) ПОС – пакет обработки сигналов, применяемый в настоящее время на предприятиях энергетической, автомобильной, авиационной, космической и других отраслей, прошедший экспертизу на базе IBM PC и платы L-203;

- 2) CONAN-1,5 – пакет контроля процессов и анализа сигналов с использованием высокоскоростных процедур экспресс- и пост-анализа, а также вычислений АЧХ, ФЧХ, корреляций и когерентности.

К достоинствам систем УСО, создаваемых на базе L-card-технологии, следует отнести:

- достаточно широкий диапазон характеристик преобразования аналоговых сигналов;

- наличие базового и специального программного обеспечения;

- возможность использования богатейшего сервиса ПО IBM PC;

- простота управления модулями УСО;

- сравнительно низкая стоимость технических средств УСО.

К недостаткам относятся:

- сравнительно небольшая номенклатура модулей УСО;

- возможность системной избыточности в следствии комплексного характера архитектуры модулей.

В 2005 году L-card Ltd. приступает к выпуску средств сопряжения, располагаемых в отдельных крейтах, подключаемых адаптерами к ПК типа IBM PC, причем характеристики и номенклатура модулей УСО, устанавливаемых в крейтах, иден-

9.1. Характеристики и цены основных модулей УСО, выпускаемых фирмой L-card (США)

Обозначение, тип канала	Разрядность, бит	Время, мкс	Число каналов	Диапазон, В	Абсолютная погрешность, %	Цена, \$	Конструктив
L-120 АЦП	12	10	16д	+10,+5,+2			
ЦАП	12	5	1/2	+10			
Дискретный ввод	8 ТТЛШ	1	1	+5	0,05	200	ХТ/АТ
Дискретный вывод	8 ТТЛШ	1	1	+5			
L-205 АЦП	12	4	16д	10,+25,+1			
ЦАП	12	5	1/2	+5			
Дискретный ввод	8/16ТТЛШ	1	1	+5	0,05	130	АТ
Дискретный вывод	8/20ТТЛШ	1	1	+5			
L-163 АЦП	12	10	16д/32гл	+10,+5,+2			
ЦАП	12	5	1гл	+10			
Дискретный ввод	4 ТТЛШ	1	1гл	+5	0,05	103	ХТ/АТ
Дискретный вывод	8 ТТЛШ	1	1гл	+5			
L-153 АЦП	12	10	16д/32гл	+10,+5,+2			
ЦАП	12	20	1	+5			
Дискретный ввод	8 ТТЛШ	1	1	+5	0,05	78	ХТ/АТ
Дискретный вывод	8 ТТЛШ	1	1	+5			
L-008 ЦАП	12	5	8	+5			
Дискретный ввод	24 ТТЛШ	1	1	+5			
Дискретный вывод	16 ТТЛШ	1	1	+5	0,05	139	АТ
Таймер		1	3	+5			
L-256 мультимплексор	16	—	256 × 16	±5, биполярный		132	ХТ/АТ

Условные обозначения: д – дифференциальные; гл – гальванически развязанные.

тичны "компьютерной" версии. Применение расширительных крейтов значительно расширяет возможности системных интеграторов по созданию УСО конкретного применения на базе программных и технических средств L-card, однако очевидны слабые стороны данного направления:

- обмен информацией с ПК возможен на расстоянии не более 1,5 м, что явно недостаточно в реальных условиях;

- обязательное наличие ПК в контуре управления является весьма дорогим по стоимости и системным временным затратам элементом многокрейтовых иерархических структур УСО;

- отсутствие международной сертификации интерфейса магистрали крейта, а, следовательно, и ограниченное число производителей данной продукции, снижает рыночную надежность продукции L-card.

9.2. Типовые модули УСО

Обозначение	Назначение, основные характеристики
DSP 25	CPU на ЦПОС TMS 320C25, 128K×16RAM
DSP 25W	CPU на двух ЦПОС TMS 320C25, 160K×16RAM
DSP 25AD	То же, с АЦП 12р, 250 кГц, ЦАП 2×12 бит, 250 кГц
DSP 31/D1M	Дополнительная DRAM для DSP31 1M×32, 1WS
MPA	4/8-канальный усилитель (K_y , K_d),
MPF	4/8-канальный модуль ФНЧ 8-го порядка, K_y до 128
DAC 12/800	4/6/8-канальный ЦАП 12 бит, 800 кГц
ADC 12/400+	8/16-канальный АЦП 12 бит, ± 10 В, ± 5 В, $\pm 2,5$ В, $\pm 1,25$ В
ADS 12*1M	8/16-канальный АЦП 12 бит, $2 \times \text{ЦАП } F_s/h = \max 30 \text{ МГц}$
ADB 12*1001	ЦАП/АЦП 12 бит с гальванической развязкой 1 кВ
PC BOX/11, 7, 3	Бокс расширения PC AT на 11/7/3 слота
King Grand	Символьный отладчик для DSP
Host 25	Функции управления для DSP

Дальнейшим развитием УСО направления ПК IBM явилось использование расширителей системной шины IBM в конструктивах типа PCBOX. Наиболее характерным представителем УСО данного типа в России является продукция фирмы "Инструментальные системы". В основу разработок положены микропроцессоры семейства TMS 320 фирмы TEXAS Instruments.

Помимо широкой номенклатуры модулей и блоков УСО фирма предоставляет программные и аппаратные средства эмуляции для отладки: линкеры, трансляторы, библиотеки, операционные системы.

Ряд типовых модулей приведен в табл. 9.2.

Достоинствами данной продукции являются:

- значительное количество обрабатываемых сигналов;
- возможность создания различных структур УСО, в наибольшей степени адаптированных к объекту сопряжения;
- наличие аппаратных и программных средств отладки;

- открытая архитектура системы;
- наличие параллельных и последовательных интерфейсов с открытыми протоколами обмена.

К недостаткам следует отнести сравнительно небольшую номенклатуру модулей УСО, ориентированную преимущественно на обработку аналоговых сигналов.

Компьютеры и контроллеры серии Micro PC предназначены для работы в сложных условиях эксплуатации:

- рабочий диапазон температур от -40 до $+85$ °C;
- допустимые перегрузки конструкции 5g при вибрации и 20g при ударе;
- среднее время безотказной работы – более 100000 ч;
- вычислительные мощности определяются типом процессора: от V20/12 МГц до 80486DX/66 МГц.

Применяемая элементная база с малой потребляемой мощностью позволяет обходиться без принудительного воздушного охлаждения. В качестве базовой

принята конструкция типоразмера 3U Евростандарта.

Наиболее известными разработчиками Micro PC являются фирмы Opto 22, Grayhell, Octagon Sitems, Analog Devices и др.

К достоинствам применения Micro PC относятся:

- развитые возможности программных средств ПК IBM, широко распространенные в мире и в России;
- наличие в нашей стране дистрибуторских фирм (ProSoft, г. Москва), обеспечивающих поставки и квалифицированное обслуживание заказчиков.

9.4. УСО В СТАНДАРТЕ VME

Лидирующее положение в области комплексов сопряжения, по данным международной ассоциации VITA и независимой корпорации VDC (Venture Development Corporation), в настоящее время занимают MMMC в стандарте VME. В мировой разработке и производстве аппаратуры VME, по данным этих же организаций, занято более 300 фирм Германии, США, Канады и др.

Фирмами, обладающими наибольшим объемом и номенклатурой выпуска, являются CES, GSC, Microsys, Motorola, OR Industrial Computers, PEP и др.

Первое анонсирование VME-магистрала состоялось в 1981 году, а в 1987 году VME был принят в качестве международного стандарта IEEE-1014.

Популярность и перспективность использования VME определяются правовыми, организационными и архитектурными преимуществами этого стандарта, а именно:

- открытая архитектура, т.е. возможность безлицензионного применения ее любым пользователем;
- международной стандарт IEEE-1014 принят национальными службами стандартов практически всех развитых стран мира;

– физическая реализация магистрали и организация интерфейса VME, обеспечивают обработку данных разрядностью 8, 16, 32 и 64 бит с адресацией 32/64 бит и быстродействием до 100 Мб/с.

В модулях VME применяются перспективные процессоры от I486DX4 до Pentium и от MC68030 до Power PC. Кроме того, рядом фирм, например PEP, начато применение микросхем MC100SX1451, именуемых Autobahn, которые позволяют увеличить скорость обработки данных до 240 Мб/с для магистралей Евроконструктива 3U и 360 Мб/с – для 6U, что создает значительные резервы вычислительных ресурсов VME для его перспективного использования.

Рассмотрим наиболее интересные особенности продукции VME некоторых фирм с точки зрения ее применения в качестве УСО тренажера.

CES (Creative Electronic Systems) – исполнение VME в конструктиве 6U.

Применяемые процессоры CISC-архитектуры MC68040 × 2 шт и RISC-архитектуры R3051, R3052, R4400 с разрядностью шины данных от 32 до 64 бит и скоростью обмена на шине от 10 до 100 Мб/с.

Номенклатура модулей – около 150 единиц.

Наиболее характерные модули данной номенклатуры:

128-канальные АЦП, 12 бит, 0-5/0-10 В, включая четыре 32-канальных быстродействующих АЦП 5 мкс;

- 4-канальные ЦАП, 12 бит, 10 мкс;
- оптоизолированный логический вывод 8 бит, 12/24/48 В;
- оптоизолированный логический ввод 8 бит, до 40 В, 100 мА;
- дискретный ТТЛ ввод-вывод 16 бит;

– ряд адаптеров, ориентированных на интерфейсы и устройства, применяемые в авиации и космонавтике стран Западной Европы и США.

Дистрибутор в России – RTSoft (Москва).

9.3. Характеристики отдельных модулей УСО, выпускаемых компанией GSC

Наименование	Разрядность, бит	Время преобразования, мкс	Число каналов
IP-16ADC	16	10	8 диф.
IP-16DAC	16	1	3
IP-ADIO ADC	13	10	8 диф./16
DAC	12	1	2
Дискретный ввод	68	1	1
Дискретный вывод	68	1	1
Таймер	24		2
IP-D48			
Дискретный ввод	48	1	1
Дискретный вывод	48	1	1
Таймер	24		2
IP-D24/022			
Дискретный ввод	24	1	1 ТТЛ
Дискретный вывод	24	1	1 ТТЛ
Инициативный ввод	1	1	1
Оптоизолированный ввод	22	1	1
Оптоизолированный вывод	22	1	1

GSC (Green Spring Computer) – выпускает VME в конструктивах 3U и 6U, модули УСО с платами типа IP (Industry Packs). Процессорные модули выпускаются на базе MC68030, MC68040. Характеристики отдельных модулей УСО приведены в табл. 9.3. Дистрибьютером фирмы также является RTSoft.

Microsys изготавливает модули VME в конструктивах 3U и 6U. Процессорные модули построены на MC68030/MC68040. Модули УСО выпускаются как в моноисполнении, так и с IP, и включают ЦАП, АЦП, дискретный ввод-вывод, в том числе с изолированными входами.

Кроме того, в состав модулей входят несколько видов графических плат типа GRC на 256 цветов, 4 или 8 бит/пиксел, с разрешающей способностью экрана 1280 × 1024 или 1600 × 1080 и объемом видеопамяти от 1 до 2 Мб.

Motorola Computer Group является одним из мировых лидеров в производстве как микросистемной элементной базы, так и модулей VME. Применяемый

конструктив – 6U, модули в моноисполнении и с IP.

Процессорные модули типа MVME выпускаются на базе MC68010/20/30/40, с разрядностью адреса и данных A32/D32.

Новое семейство MVME162 разработано с использованием процессоров серии LX с разрядностью данных A32/D64, 25 МГц, до 4 Мб DRAM, до 2 Мб SRAM, четыре места для установок IP – для расширения вычислительных и интерфейсных ресурсов MVME, а также для установки IP УСО. Имеется также широкий набор модулей сетевых интерфейсов расширения памяти и контроллеров ввода-вывода на базе MC68030.

Oettler+Reichler Industrial Computers (OR) основана в 1981 году и имеет на сегодняшний день до 500 наименований устройств в стандарте 3U VME для промышленного и военного применения (стандарт MIL STD-810).

Основное направление разработок OR – встраиваемые IBM-совместимые устройства в стандарте 3U VME, приме-

няемые в авиации, метеокосмонавтике, космической связи, автомобилестроении, медицине и т.д., что позволяет OR использовать богатый мировой опыт программных и аппаратных средств технологии IBM. Так, в комплект поставки входит OS9-DOS, OS9-Windows.

Процессорные модули собраны на микросхемах от 68000HC/16 МГц до 68040/40-50 МГц фирмы Motorola и от 80286/12,5 МГц до 80486/50 МГц фирмы Intel.

Номенклатура модулей OR имеет в своем составе серию графических модулей, на базе процессоров TMS 34020/40 МГц и видеографических модулей – на базе процессоров HD64180.

Для ввода-вывода и модулей УСО применяются 8/16-разрядные локальные шины:

- VLX-шина, подключаемая к лицевой панели связного VME-процессора;
- MLX-шина, использующая базовые VMLX модули с субмодулями IP;
- MIO-шина, использующая VMIO-модули с субмодулями типа IP;
- lihtbus – последовательная шина с оптоволоконной кольцевой линией связи, особенно эффективная в распределенных системах управления при значительных расстояниях – от нескольких десятков метров до нескольких километров и значительном уровне помех.

АЦП выпускаются 12-, 14-, 16-разрядными на 16/32 каналов с быстродействием 7, 10, 15, 25 мкс и выходными параметрами 10 мА и 5 В, 10В, $\pm 5В$, $\pm 10 В$.

ЦАП имеют 4 или 8 каналов вывода с разрядностью 12 или 16 бит, быстродействием 7, 10, 15, 25 мкс и выходными параметрами 10 мА и 5 В, 10В, $\pm 5В$, $\pm 10 В$.

Дискретный ввод-вывод обеспечивает от 16 до 52 TTL-входов/выходов, 8 релейных выходов с мощностью нагрузки до 125 В, 60 Вт.

PER Modular Computers – один из лидеров мировой промышленности в области 3U VME-стандарта. Его отличительной особенностью является многовариантность системотехнических возмож-

ностей, что обеспечивает построение оптимальной архитектуры УСО с наименьшей структурной избыточностью.

Группа системных модулей – различные контроллеры (PLC), адаптеры, платы дополнительной памяти, FDD- и HDD-диски. PLC оснащены процессорами на базе MC68020/40-60 МГц и Intel 486DX4 (от простых типа VIUC, VSBC до мощных типа VM42, VM60, V486DX4, способных выполнять задачи моделирования динамики).

Возможности самой шины 3U VME32, архитектура PLC и структура стандартного программного обеспечения (OS9 фирмы Microware) позволяют создавать многопроцессорные многозадачные системы с обменом данными на магистрали от 40 МГц и выше.

С 1993 года фирма PER приступила к поставкам модуля VM45, в котором применена шина LXB, позволившая довести обработку данных до 22 Mips.

Для связи с объектом используются модули ввода-вывода как VME, так и упрощенных расширений CXC и SMART, что значительно снижает стоимость больших комплексов УСО, т.е. комплексов с числом цепей ввода-вывода от нескольких сотен и более.

В номенклатуре модулей УСО имеется широкий набор так называемых Piggybacks-модулей, устанавливаемых на базовые модули как VME-, так и CXC-стандарта.

Для локальной обработки аналоговых сигналов в распределенных системах PER использует устройства типа MSCS, имеющие выход на PLC типа IUC/VIUC.

Сетевые средства представлены адаптерами Ethernet, X.25, STD1553.

Следует особо отметить весьма развитые возможности PER по применению сетевого стандарта Profibus, широко распространенного в европейской и североамериканской промышленности (интерфейс RS485, скорость передачи 500 Кбит/с). Причем, в случае применения PLC серии

9.4. Сравнительный анализ технических средств УСО различных фирм

Стандарт, фирма	Стоимость одного аналого- вого кана- ла DM	Быстро- действие CPU, МГц	Характеристики модулей АЦП и ЦАП				Количество типов (по известным катало- гам и проспектам)			
			АЦП (АВв)		ЦАП (АВ)					
			разряд- ность, бит	время преобра- зования, мкс	разряд- ность, бит	время преобра- зования, мкс	АВв	АВ	ДВв	ДВ
KAMAK	700-1100	1,0	12	50	12	200	4	4		8
OMRON	200-500	2,5	12	2500	12	5000	4	7	14	15
L-card	10-12	12-40	12	4-10	12	5	4	2	5	5
VME-PEP	60-180	20-40	12	8-16	12	5-25	33	6	29	31
VME-OR	34-240	25-40	12	7-16	12	7-25	11	7	8	16
Micro PC		12-66	12	9-20	12	10-20		*		
ЦОС-IS	200-300	12-40	16	5-100	16	5-100	6	6	5	6
IP-GS	100-200	12-40	16	10	16	5	8	8	12	12

VMxxx обеспечивается возможность подключения к системной шине IBM с помощью адаптера PROFIBUS PC по протоколу Profibus (скорость обмена до 1,5 Мбит/с).

Типовые характеристики модулей PEP:

- 4-канальное 12-разрядное цифроаналоговое преобразование с быстродействием от 8 до 25 мкс с выходом по току или напряжению;
- 4-, 8-, 16-канальные 10-, 12-разрядные с быстродействием 16 мкс;
- дискретный ввод-вывод на 10, 16, 20 бит напряжением 5, 24 или 80 В и током 10, 100 или 500 мА.

Программное обеспечение содержит ряд версий операционной системы OS9 для различных конфигураций и уровней, библиотеки подпрограмм и драйверов, а также инструментальные средства отладки программного обеспечения пользователя.

В заключение проведем сравнительный анализ технических средств УСО

ряда фирм по следующим оценочным параметрам (табл. 9.4):

- стоимость одного обобщенного аналогового канала преобразования;
- быстродействие CPU, управляющего набором УСО данной фирмы;
- характеристики модулей аналогового ввода (АЦП) и вывода (ЦАП), дискретного ввода (ДВв) и вывода (ДВ);
- количество типов модулей в номенклатуре фирмы.

Из таблицы видно, что наиболее дешевыми являются устройства L-серии, а наиболее дорогими – производимые в настоящее время в России (КАМАК, ЦОС), а также УСО фирмы OMRON. Оптимальная цена – у продукции фирм PEP, OR, GS.

Наименьшим быстродействием обладают контроллеры крейтов КАМАК и OMRON, наибольшим – Micro PC. Наименьшим быстродействием цифроаналогового и аналого-цифрового преобразования обладают модули OMRON, КАМАК и ЦОС, наибольшим – модули L-серии.

Наиболее широкую и разнообразную номенклатуру модулей УСО широкого коммерческого назначения имеет фирма PER.

В целом, на основании всего вышесказанного есть основание утверждать, что для создания распределенных систем УСО в тренажерных и обучающих системах с числом цепей от нескольких десятков и выше наиболее приемлемым в ближайшие годы останется УСО в стандарте VME.

9.5. ОБЗОР СТАНДАРТНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСО

Программное обеспечение УСО функционирует под управлением операционной системы (ОС). Выбор операционной системы существенно влияет на производительность комплекса вычислительных средств, что, в конечном счете, влияет на функционирование УСО в целом.

Набор операционных систем реального времени довольно широк: OS9, VxWorks, LynxOS, VRTX, pSOS+, UNIX. Набор функций различных ОС в целом одинаков, но необходимо помнить, что различные ОС разрабатывались под разные платформы, на которых они наиболее предпочтительны. OS9 зародилась как операционная система для процессоров фирмы Motorola и почти целиком написана на ассемблере семейства Motorola 68k. Этим объясняется ее необыкновенная эффективность на родственных процессорах. Как факт можно констатировать, что в настоящее время система не имеет себе равных на платформе MC68020 и MC68030.

Основные особенности архитектуры OS9 позволяют с высокой производительностью использовать аппаратные возможности вычислительных средств, а также проектировать эффективные программные алгоритмы для систем реального времени, к которым относятся тренажерные системы. К таким особенностям относятся:

- вычисления в реальном масштабе времени;
- жесткая тактируемость вычислительных процессов, причем количеством системных "тиков" в одном такте можно варьировать;
- многозадачность, которая позволяет распараллеливать процессы по времени;
- развитый механизм межадачного обмена (события, "семафоры", "звонки", порождение процессов, информационные pipe-каналы и т.д.);
- комбинированная диспетчеризация процессов;
- совершенное управление распределением памяти;
- динамическая реконфигурация вычислительной системы;
- хорошо структурированная система ввода-вывода;
- поддержка внешних устройств;
- минимизация зависимости от аппаратной платформы;
- открытость ядра, возможность его конфигурации;
- поддержка сетевых протоколов, например таких, как Ethernet, FDDI, ATM;
- поддержка стандартных интерфейсов;
- возможность внесистемной отладки;
- интегрированные пакеты разрабатчика.

Уникальность системы OS9 заключается в том, что для управления как физическим распределением памяти для программ, так и логическим содержанием памяти используются модули. Модуль – это логически замкнутая программа, программный сегмент или набор данных.

Система OS9 поддерживает десять уже определенных типов модулей и позволяет определять свои собственные типы модулей. Каждый тип модулей имеет различное назначение. Модули не обязательно должны быть полными программами или быть написанными на машинном языке. Однако они должны быть рентерабельными, т.е. повторно входимыми, позиционно независимыми и удовлетворять основной структуре модулей.

Система команд процессора 68000 поддерживает стиль программирования, называемый реентерабельным кодом, т.е. кодом, который сам себя не модифицирует. Это дает возможность двум или более процессам одновременно разделять одну и ту же "копию" любого модуля. Эти процессы не влияют друг на друга, при условии, что у каждого процесса есть независимая область своих переменных.

Почти все системные программы OS9 реентерабельны и поэтому используют память очень эффективно. Например, программа Scred для загрузки требует 26 Кб памяти. Если вы делаете запрос на запуск программы Scred в то время, когда с ней уже работает другой пользователь (процесс), система OS9 позволяет обоим процессам разделять одну и ту же копию, сохраняя таким образом 26 Кб памяти.

Исключением по отношению к требованиям реентерабельности являются модули данных. Однако для некоторых процессов, предназначенных для одновременной модификации разделяемого модуля данных, необходима тщательная координация действий.

Во многих операционных системах для размещения программы в памяти требуется указание адреса загрузки. В системе OS9 компиляторы и интерпретаторы автоматически генерируют позиционно независимый код.

При запуске OS9 после системного сброса, ядро находит модули в ПЗУ, осуществляя поиск супс-кода (\$4AFC) в заголовках модулей и проверяет корректность заголовка путем контроля его четности. Если эта проверка успешна, ядро извлекает из заголовка размер модуля, 24-разрядный код CRC. Если вычисленное значение CRC правильно, модуль вводится в каталог модулей. Система OS9 сцепляется с любым из составляющих ее модулей, которые были найдены во время поиска.

Все модули, размещенные в ПЗУ, заранее установленные в системе при начальной загрузке, автоматически включаются в каталог системных модулей. Это позволяет создавать системы, частично или полностью хранимые в ПЗУ. В системе включаются также любые несистемные модули, найденные в ПЗУ. Это позволяет выявить в процессе запуска системы программное обеспечение, поддерживаемое пользователем, и ввести его в каталог модулей.

Ядро OS9 по составу функций является типичным ядром системы реального времени. Выделяются следующие группы функций ядра:

- управление задачами;
- управление памятью;
- межзадачный обмен;
- обработка исключений процессора;
- управление внешними устройствами;
- поддержка среды отладки;
- поддержка многопользовательской среды.

Первоочередная задача ядра – обработка и координация системных вызовов (обслуживание запросов). В OS9 приняты два основных типа системных вызовов:

- вызовы, выполняющие ввод-вывод, такой как чтение или запись;
- вызовы, выполняющие системные функции.

К системным функциям относятся управление памятью, инициализация системы и обработка исключительных ситуаций/прерываний. Когда выполняется системный вызов, происходит обращение к ядру через пользовательское прерывание. Ядро определяет, какой тип системного вызова хочет выполнить пользователь – вызовы системных функций оно выполняет непосредственно, для каждого вызова ввода-вывода ядро выполняет первый уровень обработки, а вызовом соответствующего менеджера или драйвера завершает необходимую функцию.

OS9 – многозадачная операционная система, которая позволяет отдельным

независимым программам, называемым процессами или задачами, выполняться одновременно. Ядро OS9 определяет, который из процессов активен, учитывая их приоритеты, и как долго должен выполняться. Переключение выполнения одного процесса на выполнение другого называется переключением задач. Переключение задач не влияет на выполнение программ.

Центральным местом любой системы реального времени является алгоритм управления задачами. Алгоритм, реализованный в рамках системы OS9, отличается особой гибкостью и эффективностью. Основной идеей алгоритма является предоставление пользователю возможности динамически выбирать тип алгоритма в зависимости от приложения и складывающейся ситуации.

В результате манипулирования системными константами или изменения системного контекста в каждый момент времени возможен выбор одного из трех типов режимов:

- однозадачный режим – выделенный процесс монополизировать все системные ресурсы;
- round-robin-диспетчеризация – системные ресурсы разделяются на равных несколькими процессами с самым большим приоритетом;
- пропорциональная диспетчеризация – все процессы разделяют ресурсы пропорционально приоритетам.

Гибкая система диспетчеризации дополнена гибкой системой управления квантом времени, разделяющим моменты диспетчеризации, что позволяет при правильном пользовании существенно уменьшать общие системные издержки.

Часы реального времени каждый тик прерывают работу CPU. По умолчанию тик равен 0,01 с (10 мс). Каждый тик OS9 может приостанавливать выполнение одной программы и начать выполнение другой. Длительность тика зависит от аппаратной части системы. Поэтому, чтобы изменить длительность тика, необходимо

переписать драйвер часов и реинициализировать аппаратную часть.

Наибольшее количество времени, в течение которого процесс будет управлять CPU перед тем, как ядро пересмотрит очередь активных процессов, называется квантом времени. По умолчанию один квант равен двум тикам. Изменить количество тиков в кванте можно настройкой глобальной переменной `D_TSLice` или модификацией модуля `Init`.

Для обеспечения эффективности кандидатами на выполнение рассматриваются только процессы из очереди активных. Очередь активных процессов организуется по возрастам процессов. Возраст процесса – это счетчик переключений процесса с момента, когда он вошел в очередь, плюс начальный приоритет процесса. Во главе очереди стоит самый старый процесс. Алгоритм диспетчеризации в системе OS9 выделяет каждому активному процессу для его выполнения некоторое количество времени.

Когда процесс помещается в очередь активных процессов, его возраст устанавливается равным назначенному ему приоритету, а возрасты всех других процессов увеличиваются на единицу. Возрасты никогда не могут быть выше \$FFFF.

По окончании кванта времени текущего выполняющегося процесса ядро выполняет процесс самого старшего возраста.

Управление памятью в системе OS9 является одним из самых совершенных среди систем ее класса. В основе лежит процесс "раскрашивания" памяти, который производится пользователем на этапе конфигурирования системы.

"Раскрашивание" состоит в приписывании каждому блоку памяти определенного "цвета" и приоритета. Приоритет позволяет системе распределять в первую очередь более быструю память. "Цвет" служит для того, чтобы выделять области памяти, которые должны распределяться только по специальному запросу (различные виды "шинной" памяти).

Эти принципы распределения памяти хорошо дополняют принцип открытости аппаратной конфигурации.

Кроме того, пользователь имеет возможность выбрать один из двух алгоритмов поиска свободной памяти при распределении. Первый алгоритм исходит из наиболее плотной укладки свободных блоков и, таким образом, повышает коэффициент использования памяти. Второй – заранее сортирует свободные блоки по размеру, что существенно сокращает время поиска подходящего блока.

Способы межадачного обмена в основном соответствуют стандарту на переносимые операционные системы POSIX 1003. В настоящее время система поддерживает:

- порождение и сигнализация о завершении процесса с отслеживанием "родословной" процесса;
- межадачные сигналы;
- программные каналы (в том числе все системные);
- механизм событий;
- "будильники";
- семафоры;
- разделяемые модули памяти;
- различные типы файловых систем на внешних носителях.

Система предоставляет простой механизм управления обработкой прерываний процессора. Все прерывания делятся естественным образом на несколько групп, каждая из которых управляется по-своему.

Наиболее индивидуально обрабатываются аппаратные прерывания (такие как ошибка шины, неверный адрес, нарушение привилегированности и т.д.). Каждый процесс имеет возможность динамически устанавливать собственный обработчик такого прерывания, не требующий никаких дополнительных системных структур.

Программные ловушки также обрабатываются каждым процессом индивидуально, но их обработчики сосредоточены в специальных программных модулях, что позволяет создавать универсальные

алгоритмы, используемые группой задач без дополнительных затрат на отладку и экономия память.

Обработчики внешних прерываний объединяются в приоритетные списки, общие для всей системы. Специальные соглашения позволяют каждому обработчику распознавать и обрабатывать "свое" прерывание. Обычно такие обработчики располагаются внутри специальных модулей памяти и используются асинхронно ядром системы.

Особым видом обработки прерывания является обработка системного вызова, означающая, что обработка вызова может быть динамически изменена, а система может быть дополнена новыми вызовами.

Управление внешними устройствами в системе происходит на нескольких уровнях.

Самый верхний уровень представлен менеджером ввода-вывода (IOMAN). Это системный модуль, который содержит обработчики системных вызовов, связанные с вводом-выводом, и производит размещение в памяти необходимых структур.

Средний уровень состоит из файловых менеджеров, ответственных за управление логическими потоками данных. На этом уровне определяется файловая структура. Таким образом, для поддержки любой нестандартной файловой системы достаточно включить в систему определенный программный модуль, что можно сделать динамически обычными системными средствами.

Вся работа с физическими регистрами сосредоточена на нижнем уровне в драйверах устройств. Здесь же, как правило, происходит первичная буферизация данных.

Интерфейс между уровнями жестко специфицирован. Таким образом, достигается полная независимость разработчиков каждого уровня друг от друга. Еще одно преимущество многоуровневого строения системы ввода-вывода состоит в том, что поддержка любого устройства и

всей системы в целом в любой момент может быть добавлена или удалена из системы. Избавляясь от излишних на текущий момент функций, можно в значительной степени экономить системные ресурсы.

Основным принципом построения системы является максимальная открытость структур и функций.

Системные таблицы и области памяти функционально строго специфицированы и не меняют своего назначения в процессе работы. Доступ к ним осуществляется стандартными системными средствами. Прикладной процесс в любой момент времени может вмешаться практически в любой системный алгоритм, приспособившая вычислительную среду для нужд прикладного проекта.

Открытость системы достигается за счет последовательного модульного построения. В результате операционная среда может быть легко переконфигурирована в процессе исполнения приложения. "Время жизни" и описание почти любого системного ресурса определяется динамически и не связывает пользователя заранее заданными жесткими рамками. Такой подход к системе органично дополняет понятие реального времени, открывая совершенно новые возможности при проектировании промышленных управляющих систем.

Принципиальным требованием системы является реентерабельность и переносимость программного кода. Эти две характеристики кода поддерживаются всеми компиляторами системы автоматически и не требуют от программиста никаких дополнительных усилий.

Реентерабельность достигается за счет сосредоточения постоянных частей кода в модулях памяти, в то время как области глобальных переменных распределяются системой для каждого процесса в момент порождения. Все переменные части кода оказываются изначально разделены для задач на уровне системы. Ре-

ентерабельность кода естественно приводит к аппарату резидентных динамических библиотек подпрограмм, которые могут использоваться всеми процессами одновременно.

Переносимость подразумевает создание компиляторами кода, не содержащего абсолютных адресов. Все ссылки внутри кода реально разрешаются в момент загрузки модуля в память или в момент создания процесса.

Специальные опции компиляторов позволяют привязывать код к абсолютным адресам для программирования PROM.

Поддержка основных типов приложений в системе и системы в целом опирается на основной принцип поддержки стандартов в каждой предметной области. Поддержка стандартов является единственной гарантией существования системы при любой конъюнктуре в аппаратной сфере или в сфере развития коммуникаций.

Для каждого типа программного обеспечения ведущие разработчики, создающие свои продукты на базе OS9, стараются следовать наиболее признанным в мире стандартам.

Система в целом – POSIX 1003.

Компиляторы – ANSI стандарты.

Графические интерфейсы – X-Window (Motif).

Сетевые интерфейсы – TCP/IP, N.F.S., RPC (поддержка серверной и клиентской частей протоколов SLIP, telnet, ftp, tftp, bootp), PROFIBUS.

Базы данных – SQL-интерфейс, классические сетевые модели (dbFile).

9.6. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Значительные вычислительные ресурсы контроллеров VME, а также возможность комплектования крейтов "твердыми", "гибкими" дисковыми и видеотерминалами с клавиатурой позволяет создавать на их базе отладочные комплексы.

Фирма PER, в частности, предоставляет пользователю ряд программных продуктов типа OS9DPX-RG-xxx, ISaGraf, WxWorks, PC Bridge, позволяющих выполнять:

- генерацию ядра пользовательской ОС со всеми необходимыми драйверами и подпрограммами;
- разработку и отладку программ пользователя;
- комплексную отладку ПО на эмуляторах и рабочем оборудовании, запись рабочих ОС и программ на внешние носители или в перепрограммируемую память контроллеров.

В качестве примера возможной инструментальной системы рассмотрим возможности базового инструментария OS9 DPX-RG-VM30.

Базовые инструментальные средства системы являются продолжением функций ядра на более высоком уровне. Стандартный набор средств не меняется от системы к системе и состоит из компиляторов, отладчиков, текстовых редакторов, утилит работы с файловой системой, утилит статистики и управления процессами.

Базовый инструментарий DPX-RG-VM30 представлен встраиваемой системой разработки, основанной на Development-ядре, которая функционирует в той же вычислительной среде, что и разрабатываемое приложение. Достоинством встраиваемой системы разработки являются простота (следовательно, невысокая стоимость), мгновенный переход от разработки к исполнению и наоборот, дополнительные возможности управления исполнением.

Элементами описываемой системы разработки служат компиляторы, отладчики, текстовые редакторы, средства поддержки проектов, утилиты управления файловой системой, утилиты управления процессами, статистические утилиты, средства поддержки внешних накопителей.

Фирма – разработчик операционной системы Microware Systems Corp. (USA)

поставляет и поддерживает компиляторы для наиболее распространенных языков высокого уровня: C, FORTRAN, Pascal, BASIC. В настоящее время проходит окончательное тестирование компилятор C++. Все эти компиляторы поддерживают стандарт ANSI.

Наибольший интерес в этой области представляет новое поколение компиляторов, первый из которых Ultra-C. Новое семейство отличается современной технологией получения исполняемого кода, когда на определенной стадии компиляции получается так называемый "промежуточный код" (I-Code). Этот формат представления программного алгоритма специально спроектирован для осуществления оптимизации кода еще на доасемблерной (алгоритмической) стадии.

I-Code может быть получен из исходного кода на любом языке высокого уровня. После этого происходит сборка и глобальная алгоритмическая оптимизация полученных модулей. Предварительно оптимизированный код транслируется в ассемблерный и еще раз локально оптимизируется обычным ассемблерным оптимизатором. Уровень оптимизации и соотношение между оптимизацией "по времени" и "по объему" задается опциями компилятора. При максимальной оптимизации по времени исполнения получающийся код в 1,5–2,5 раза эффективнее полученного обычным компилятором.

Благодаря широкому распространению системы, базовые и прикладные средства для нее пишут десятки крупных разработчиков программного обеспечения. В каталоге программных продуктов для OS9 можно найти, наряду с уже упомянутыми, компиляторы Forth, Ada, PROLOG, LISP и другие менее распространенные.

Система DPX-RG-VM30 предоставляет три вида отладчиков: пользовательский символьный, системный символьный и пользовательский уровня исходного кода.

Символьный пользовательский отладчик ориентирован на отладку в кодах ассемблера с использованием таблицы глобально определенных символов и предназначен для отладки несложных, не затрагивающих систему приложений. Его достоинство – простота использования и "незаметность" для системы.

Системный отладчик позволяет отлаживать непосредственную работу с системными ресурсами и обработку исключительных состояний, и предназначен, прежде всего, для системных программистов.

Каждый отладчик уровня исходного кода ориентирован на определенный язык высокого уровня и незаменим при отладке больших, разветвленных прикладных проектов. Фирма-разработчик предоставляет и поддерживает отладчик только для языка С.

Стандартно в системе поддерживает-ся только один полноценный экраный редактор – микроEMACS. Это довольно распространенный в мире редактор со стандартными функциями вплоть до поддержки многооконности. Кроме того, к услугам разработчиков большой выбор двоничных редакторов, большинство из которых распространяются как freeware.

Простейшим средством поддержки проектов в системе является утилита make. Она предназначена для создания командных процедур сборки программных проектов и по своим возможностям практически не отличается от аналогичной UNIX-утилиты.

Более развитые средства представлены пакетом поддержки версий проекта POLYTRON. Данный пакет состоит из нескольких утилит, позволяющих группе разработчиков вести независимую разработку частей проекта, автоматически разветвляя, сливая и фиксируя новые версии.

Кроме того, в состав пакета входит утилита polymake с более богатым синтаксисом, нежели стандартный make. Грамотно написанные командные файлы для polymake позволяют разработчикам на

протяжении всей разработки только перечислять файлы с исходными текстами, не вспоминая об алгоритме сборки.

Утилиты разработчика служат для организации процесса разработки и контроля за вычислительной средой. В частности, они позволяют организовать разработку на фоне исполнения уже готовых частей системного проекта.

Разнообразие существующих в мире внешних устройств и интерфейсов к ним исключает возможность их поддержки одной фирмой-разработчиком. В этом смысле важно, насколько просто та или иная операционная система позволяет интегрировать в вычислительную среду новые устройства.

Для решения этой проблемы приходится решать две, часто разнесенные во времени и пространстве задачи: управление логическими потоками данных и управление физическими потоками.

На принципиальном уровне OS9 решает эту проблему предоставлением многоуровневой системы управления вводом-выводом. Две упомянутые задачи реально разводятся на системном уровне. Логические потоки организуют файловые менеджеры, физические – драйверы устройств. И те и другие специфицированы и доступны для написания и интеграции в систему.

Драйверы по своей природе более многообразны, и ответственность за их написание чаще приходится брать на себя конечным или, во всяком случае, менее квалифицированным пользователям. Поэтому для их создания в рамках поддержки системы существует специальный инструмент разработки – пакеты разработчиков.

Стандартный пакет разработчика создается, как правило, совместно фирмой – разработчиком системы и фирмой – поставщиком конкретной аппаратуры. В пакет входят исходные тексты драйверов всех входящих в конфигурацию устройств, спецификации, примеры, руководства по реконфигурации.

Microware связана OEM-соглашениями практически со всеми крупнейшими поставщиками аппаратуры для промышленных комплексов. Ведущие фирмы в обязательном порядке поставляют свои наиболее популярные конфигурации вместе с пакетами разработчика. Среди этих фирм – Creative Electronic Systems S.A., Eltec Elektronik, Force Computers Inc., Gespac Inc., GreenSpring Computers, Motorola Inc. Computer Group, OR Industrial Computers GmbH, PEP Modular Computers, Philips Industrial Automation Systems, Themis Computer.

Пакеты разработчика значительно ускоряют и упрощают процесс адаптации оборудования ко всему комплексу и позволяют приобрести разработчикам конечного уровня необходимые системные навыки, повысив их квалификацию в целом.

Еще одной инструментальной системой, активно применяемой в последние годы многими зарубежными и отечественными фирмами, является "ISaGRAF for DOS" ("ISaGRAF for WINDOWS") – продукт французской фирмы CJ International, представляющая собой CASE-инструмент (Computer Aided Software Engineering), предназначенный для разработки приложений, функционирующих на программируемых логических контроллерах (PLC) в системах автоматизации.

В ISaGRAF заложена методология структурного программирования, дающая возможность пользователю описать автоматизируемый процесс в наиболее легкой и понятной форме.

Интерфейс с пользователем системы ISaGRAF соответствует международному стандарту GUI (Graphical User Interface), включающему многооконный режим работы, полнографические редакторы, работу с мышью и т.д.

Интегрированная система ISaGRAF обладает рядом технических возможностей, делающих ее наиболее привлекательной для пользователя. Рассмотрим основные из них.

Поддержка всех пяти стандартных языков программирования PLC (стандарт IEC 1131-3), а именно:

- язык последовательных функциональных схем (Sequential Function Charts, или Grafcet), описывающий логику программы на уровне чередующихся процедурных шагов и переходов;

- язык функциональных блочных диаграмм (Function Block Diagrams), позволяющий пользователю построить комплексную процедуру, состоящую из различных функциональных библиотечных блоков (арифметических, тригонометрических, блоков управления логикой, PID-регуляторов, блоков описания некоторых законов управления, мультиплексоров и т.д.);

- язык релейных диаграмм, или релейной логики (Ladder Diagrams), используемый для описания логических выражений различного уровня сложности;

- язык структурированного текста (Structured Text), относящийся к классу языков высокого уровня. На его основе можно создавать гибкие процедуры обработки данных;

- язык инструкций (Instruction List), относящийся к классу языков низкого уровня и позволяющий создавать эффективные, оптимизированные процедуры;

- при недостатке этих языков ISaGRAF поддерживает интерфейс к функциям, написанным на языке "ANSI C", но в этом случае требуется компилятор (для MS DOS – MSC 7.0, а для OS9 – ULTRA C или Cross ULTRA C).

ISaGRAF позволяет широко "смешивать" программы/процедуры, написанные на разных языках, а также вставлять кодовые последовательности из одного языка в коды, написанные на другом.

Наличие мощного отладчика, позволяющего во время работы прикладной задачи просматривать состояние программного кода, переменных, программ и многое другое.

Поддержка основных функций протокола MODBUS (RTU, SLAVE):

- FUNCTION1: read N bits;
- FUNCTION3: read N words;
- FUNCTION5: write 1 bit;
- FUNCTION6: write 1 word;
- FUNCTION16: write N words.

Реализация опций, обеспечивающих открытость системы для доступа извне к внутренним структурам данных прикладной ISaGRAF-задачи (опция ISaGRAF SERVER), а также возможность разработки драйверов на модули ввода-вывода самим пользователем (опция ISaGRAFOEM) и портации ISaGRAF-ядра под любую аппаратно-программную платформу.

Набор драйверов для работы с устройствами ввода-вывода под управлением контроллеров фирм-производителей PEP Modular Computers, Motorola MVME-162, ABB, Computer Boards, Keitley Metrabyte, WEIDMULLER, Industrial Computer Source и др.

Наличие дополнительных интерактивных редакторов для описания переменных, определений и конфигураций ввода-вывода.

Встроенные средства контроля за внесением изменений в программный код ISaGRAF-приложения и печати отчетов по разработанному проекту с большой степенью детализации, включая печать таблиц перекрестных ссылок для программ и отдельных переменных.

Полное документирование системы разработки и языков программирования.

Помимо общих, существуют специфические функции, реализованные на конкретных аппаратно-программных платформах. Эти особенности описываются специально фирмами-поставщиками. Например, PEP Modular Computers реализовала и интегрировала в среду ISaGRAF драйверную поддержку стандарта промышленной сети PROFIBUS. ISaGRAF работает с функциями второго уровня сети PROFIBUS (передача данных).

Таким образом, пользователь, имея одну систему разработки ISaGRAF, может не только запрограммировать логику ра-

боты PLC с устройствами ввода-вывода, но и организовать межконтроллерную связь по протоколу PROFIBUS.

Условно, пакет ISaGRAF можно разделить на две компоненты: систему разработки (ISaGRAF DevSys) и систему исполнения (ISaGRAF Target).

Коммуникационная задача обеспечивает поддержку процедуры загрузки пользовательского ISaGRAF-приложения со стороны PLC, а также доступ к рабочим переменным этого приложения со стороны отладчика системы разработки ISaGRAF. Кроме того, коммуникационная задача реализует также поддержку протокола MODBUS, что дает возможность доступа к данным на контроллере не только отладчику ISaGRAF, но и любой системе визуализации и управления данными, например SCADA, имеющей соответствующий драйвер MODBUS.

Драйверы UCO организуют прозрачный доступ к аппаратуре ввода-вывода и делают этот процесс стандартным для конкретной ОС.

Функции пользователя описывают процедуры и алгоритмы функций, не реализованных в стандартном варианте поставки системы ISaGRAF.

Системные функции предназначены для описания специфики конкретной ОС, реализованной на данном типе контроллеров.

Ядро ISaGRAF реализует поддержку стандартных языков программирования PLC и стандартного набора функций и функциональных блоков.

Минимальная продолжительность циклов исполнения прикладной задачи определяется характеристиками аппаратно-программной платформы (ISaGRAF Target), на которой происходит исполнение задачи: для MS-DOS этот цикл не может быть менее 55 мс, для OS9 – равен 10 мс. Но если параметр синхронизации установить равным нулю, то прикладная задача будет выполнять программные последовательности без ожидания.

СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКИ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ

10.1. ЗАДАЧИ ОПЕРАТОРОВ, РЕШАЕМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Система имитации визуальной обстановки является составной частью контура моделирования условий деятельности оператора. Она позволяет воспроизводить ту визуальную картину, которую видит оператор, управляя реальным объектом. Важность этой системы определяется значимостью и большим объемом информации, который приходится на долю зрительного канала и составляет по некоторым оценкам до 80 % всей информации, поступающей оператору в процессе управления объектом. На основе этой информации экипаж осуществляет оценку своего пространственного положения относительно других объектов среды, определяет скорость, направление движения, осуществляет целенаправленные действия при выполнении различных динамических операций. Используя визуальную информацию, операторы выполняют задачи наблюдения (мониторинга), селекции и опознавания целей, оценку расположения и дальности отдельных объектов, с которыми они взаимодействуют при выполнении поставленной задачи.

Содержание наблюдаемой визуальной картины и состав видимых объектов определяются областью практической деятельности операторов, особенностями решаемых задач, а также особенностями используемых средств наблюдения управляемых ими объектов. Так, для космических и авиационных тренажеров объектами наблюдения являются земная поверхность, звезды, другие летательные аппа-

раты, с которыми осуществляется совместный полет, аэродромы, палубные и другие посадочные площадки. Для автомобильных и железнодорожных тренажеров необходимо отображать дорожное полотно, объекты ландшафта, дорожные знаки, встречные и попутные движущиеся средства, препятствия и др. Для морских тренажеров визуальная обстановка включает морскую поверхность с различной степенью волнения моря и в разных местоусловиях, береговые сооружения, причалы, водные и воздушные объекты, находящиеся вблизи и выполняющие свои самостоятельные задачи.

С учетом решаемых задач арсенал средств наблюдения, которые позволяют эффективно использовать наблюдаемую обстановку для управления объектом, чрезвычайно широк. В зависимости от характера решаемых операторами задач для наблюдения на реальных объектах используются защитные стекла (лобовое и боковое остекление) либо иллюминаторы, а также различные оптические приборы (перископы, окуляры, визиры, радиолокационные индикаторы и др.). В ряде случаев эти приборы оснащаются средствами кино- и фоторегистрации, варифокации и фиксации изображений в различных спектральных диапазонах.

Для обеспечения адекватности воспроизводимых условий деятельности операторов в отрабатываемых ситуациях на тренажерах необходимо достаточно полно и правильно воспроизводить в средствах наблюдения визуальную картину внешней среды.

Приведем некоторые примеры задач, связанных с использованием приборов

наблюдения, которые устанавливаются, в частности, на борту пилотируемых космических аппаратов.

В космическом полете одной из наиболее сложных и ответственных динамических операций, требующих от экипажа умения управлять объектом на основе визуальной информации, является сближение и стыковка транспортного корабля с орбитальной станцией в ручном режиме управления.

При решении задачи ручного управления процессом сближения и стыковки экипаж транспортного корабля использует оптический визир ВСК-4 (центральное поле зрения) и изображение, формируемое внешней телекамерой Кл-140СТ-ПИ телевизионной системы Кл-100-01М (наблюдаемое на индикаторе ИнПу), а также иллюминаторы спускаемого аппарата (СА) по осям $+Z$, $-Z$, называемых соответственно левым и правым иллюминаторами и дополнительный иллюминатор в бытовом отсеке по оси $-X$, называемый «блистером».

Оптический визир имеет центральное поле с углом зрения 15° для контроля процесса сближения, стыковки и построения пространственной ориентации. Оптическая ось центрального поля имеет два фиксированных положения: параллельно оси $-X$ или Y транспортного корабля. Одной из особенностей конструкции визира ВСК-4, учитываемым при моделировании его работы в условиях тренажера, является возможность:

- использования линзового и матового экранов;
- управления фокусировкой изображения;
- введения полупрозрачных фильтров различной плотности и непрозрачной шторки.

Телекамера Кл-140СТ-ПИ расположена снаружи бытового отсека. Оптическая ось ее направлена по оси $-X$ транспортного корабля. На телекамере установлены два сменных объектива – широ-

коугольный и узкоугольный. Телекамера формирует черно-белое изображение с электронным перекрестием. Следует указать, что при работе телекамеры в режиме широкого угла в поле зрения камеры попадают элементы конструкции бытового отсека транспортного корабля, что нужно иметь в виду при моделировании ее работы на тренажере.

Процесс сближения и стыковки ПКА состоит из нескольких этапов, к которым относятся:

1. Поиск и обнаружение объекта стыковки.
2. Сближение.
3. Причаливание.
4. Стыковка.

Поиск объекта стыковки начинается, как правило, с расстояния несколько десятков километров по целеуказаниям с Земли. На этих расстояниях объект встречи представляет собой светящуюся точку с параметрами, идентичными характеристикам звезд. Процесс поиска и обнаружения объекта стыковки заключается в селектировании движущейся точки на фоне звездного неба. Визуальная селекция может производиться по следующим признакам:

- угловое перемещение «цели» относительно фона звезд;
- изменение яркости «цели» – селекция по яркости;
- отличие цвета «цели» от цвета звезд.

Наибольшей информативностью при этом обладают яркостные и цветовые признаки «цели».

В процессе сближения происходит переход от образа объекта стыковки как точки к адекватному восприятию формы и цвета. Относительная дальность такого визуального перехода зависит от характеристик используемых боковых средств наблюдения, фона, на котором производится наблюдение орбитальной станции, ее ориентации, условий освещения Солцем объекта встречи. При отсутствии

приборной информации о параметрах относительного движения объектов стыковки экипаж транспортного корабля использует лазерный дальномер ЛПР и иллюминатор ("блистер") бытового отсека для определения относительной дальности, а по их значениям – скорости сближения объектов.

На этапе причаливания экипаж транспортного корабля определяет визуально угловое положение МКС относительно линии визирования. При отсутствии встречной ориентации МКС экипаж по изображению объекта стыковки определяет направление облета и осуществляет маневрирование в сторону стыковочного узла орбитального комплекса.

Наблюдая изображение станции, экипаж фиксирует выводимые на экран данные с бортовых систем о дальности, относительной скорости, взаимном угловом положении стыкуемых объектов; на основе этой информации и визуального изображения станции он осуществляет управление движением корабля посредством отклонения ручек управления РУО и РУД (см. гл.17), включая соответствующие датчики причаливания и ориентации.

Аналогичные действия выполняет космонавт-оператор на борту модуля "Звезда" (СМ) МКС при реализации телеоператорного режима управления (ТОРУ), который используется в случае отказа автоматического режима сближения, причаливания и стыковки с МКС транспортных грузовых кораблей (ТГК) и целевых модулей (ЦМ). Управление движением ТГК (или ЦМ) осуществляется космонавтом с рабочего места ТОРУ, расположенного в районе центрального поста СМ. Имея перед собой на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ) ИТ-Ц телевизионное изображение станции, космонавт-оператор ТОРУ осуществляет управление движением объекта стыковки с помощью ручек управления РУД и РУО. Указанная телевизионная информация передается с объекта встречи по каналу

межбортовой УКВ радиосвязи. Управляющие сигналы с ручек управления на систему управления движением ТГК (ЦМ) также передаются по радиоканалу. Режим ТОРУ рекомендуется использовать с дальности порядка 800 м.

Операция сближения на этапе причаливания и стыковки может производиться и в ночных условиях освещенности (при нахождении в тени Земли). В данном случае экипаж транспортного корабля или МКС (при выполнении режима ТОРУ ТГК) использует узконаправленный источник света – фару (конусы с углами 16° или 5° , переключаемым по внешним командам) с ограниченной дальностью действия (примерно 100 ... 150 м). Следует иметь в виду, что космические аппараты при нахождении в тени имеют подсветку отраженным от поверхности Земли светом.

При построении системы имитации визуальной обстановки в тренажере следует учитывать особенности внешних условий и те проблемы, которые затрудняют выполнение операции в реальных условиях. Так, в частности, визуальные условия наблюдения в космосе связаны с отсутствием рассеивающей атмосферы. Это приводит к тому, что теневые части объекта стыковки выглядят совершенно черными, сливающимися с темным фоном, а полированные поверхности создают почти зеркальные отражения Солнца. На зрительный образ орбитальной станции, наблюдаемой в условиях космоса при освещении ее Солнцем или фарой транспортного корабля, существенное влияние также оказывают падающие тени, создаваемые элементами конструкции МКС и ее модулей, а также приближающимся активным объектом (транспортный корабль, модули в процессе сближения и стыковки с МКС). Эти тени на заключительном этапе причаливания затрудняют визирование стыковочной мишени и определение взаимного пространственного положения стыковочных узлов.

Неблагоприятные условия наблюдения орбитальной станции создаются также при ее нахождении на фоне облачной поверхности Земли с произвольной структурой, поскольку контрастность изображения объекта стыковки значительно снижена.

В режиме ТОРУ уровень принимаемого радиосигнала может изменяться в значительных пределах, что обуславливает появление на ВКУ шумов и помех (срывов кадровой и строчной синхронизации), затрудняющих процесс принятия решения и формирования управляющих воздействий.

Желательно, чтобы инструктор имел возможность регулировать изменяемые в реальных условиях характеристики изображений, обучая экипажи действовать в различных, в том числе, самых сложных ситуациях.

Еще одним примером использования специальных оптических приборов является задача установления пространственного положения ПКА и обеспечения ему некоторой заданной ориентации. Ориентация осуществляется с помощью оптического визира ВСК-4 на транспортном корабле и ВШТВ на модуле "Звезда" МКС. Основной способ ориентации основан на визуальной оценке космонавтом рассогласования между текущим положением физических опорных ориентиров и соответствующих реперных отметок в поле визира. Ориентация считается выполненной, если изображения опорных ориентиров и реперов совпадают в поле прибора. Применение визуальных инструментальных средств в ручном контуре системы управления ориентацией ПКА позволяет обеспечить следующие виды ориентации:

1. Трехосную орбитальную ориентацию.
2. Трехосную гравитационную ориентацию.
3. Трехосную инерциальную ориентацию.

Каждый вид ориентации имеет свои специфические особенности в работе кос-

монавта с визуальными приборами наблюдения.

Например, орбитальная ориентация МКС выполняется с помощью визира ВШТВ. Основная особенность этого оптического прибора заключается в его широкоугольности (угол поля зрения 190°), а также наличии собственных только этому визиту дисторсионных и перспективных искажений изображения визируемого пространства. Эта особенность визира имеет важное значение при выборе того или иного метода моделирования его работы.

Основными элементами внешней визуальной обстановки, используемыми при выполнении орбитальной ориентации, являются наземные ориентиры, горизонт Земли и направление "бега" подстилающей поверхности. Для контроля и построения ориентации по тангажу и крену на освещенной части орбиты используется изображение горизонта Земли, которое должно располагаться concentрично или симметрично относительно окружностей сетки на экране визира ВШТВ (на транспортном корабле реперных отметок для каждого периферийного канала обзора визира ВСК-4 в режиме его работы "визир-ориент"). При этом оптическая ось визира совпадает с местной вертикалью. Курсовая ориентация выполняется (контролируется) по направлению "бега" Земли относительно курсовой черты прибора.

Визир ВШТВ используется также при выполнении гравитационной ориентации путем приведения продольной оси объекта к местной вертикали. Контроль ориентации производится по положению горизонта Земли в поле зрения прибора. Для построения и контроля трехосной инерциальной ориентации МКС используется бортовой оптический прибор ПВП, который при визировании звезд может выполнять функции астроориентатора. Как правило, в качестве навигационных ориентиров в системах астроориентации и навигации используются звезды от минус 2 до плюс 4 звездной величины.

В авиационных и наземных транспортных средствах визуальная обстановка отображается через остекление кабины, которое имеет широкий угол обзора. Одной из основных проблем визуализации в тренажерах таких объектов является имитация тех факторов (стереозэффект, изменение детализации изображения от расстояния, параллакс движения), которые позволяют человеку оценивать расстояние до ближайших объектов взаимодействия. Особенно это важно при отработке сложных динамических операций (посадка летательного аппарата на земную поверхность или палубу авианосца, маневрирование автомобилем в ограниченном пространстве при движении по улицам города, наличии встречного транспорта или при обгоне).

Обобщая приведенные примеры, можно сделать вывод о том, что в техническом отношении визуализация в тренажерах представляет собой достаточно сложную задачу. Сложность построения систем имитации визуальной обстановки определяется широким диапазоном изменения условий наблюдения (дневные и ночные условия освещенности, наличие управляемых источников света), значительным диапазоном изменения дальности (например, при стыковке с МКС в дневных условиях освещенности оператор наблюдает объект на расстоянии начиная от дальности 50000 м до дистанции физического контакта стыковочных узлов), многообразием объектов, которые могут содержаться в сюжете внешней визуальной обстановки и большим разнообразием состава бортовых средств наблюдения в управляемых объектах.

Следует отметить, что кроме имитации визуальной обстановки для оператора при создании СИВО тренажера необходимо предусматривать дублирование наблюдаемой экипажем обстановки на рабочих местах инструкторов, имитацию работы бортовой телевизионной аппаратуры и других систем наблюдения, использующих принципы ночного видения,

лазерного обнаружения, радиолокации, эхолокации и т.п.

10.2. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СИВО В АВТОНОМНЫХ ТРЕНАЖЕРАХ И ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Под системой имитации визуальной обстановки будем понимать совокупность программных и аппаратных средств, позволяющих формировать и воспроизводить в средствах наблюдения экипажа и на ПКУ внешнюю визуальную среду, идентичную той, которая имеет место при работе операторов на реальном объекте.

Типовая структура системы имитации визуальной обстановки тренажера представлена на рис. 10.1. Основными элементами СИВО являются формователи первичных изображений (ФИ). В качестве формователей изображения могут использоваться физические макеты наблюдаемых объектов, кино- и фотоносители, а также компьютерные системы синтеза изображений.

Формируемые изображения (в том числе, размер, освещенность и расположение наблюдаемых объектов внешней среды относительно наблюдателя) должны полностью соответствовать моделируемой на тренажере ситуации. Поэтому управление ФИ осуществляется от моделирующего комплекса тренажера. В результате моделирования движения управляемого объекта производится расчет его положения в пространстве и расчет положения всех видимых оператором объектов внешней среды. На основании этих расчетов определяется относительное положение внешних объектов, и для формователя каждого изображения рассчитывается такое управляющее воздействие, которое обеспечивает адекватное воспроизведение наблюдаемой визуальной картины в средствах наблюдения (СН) РМО.

В современных объектах на фоне визуальной информации часто отображаются специальные метки, перекрестия, мас-

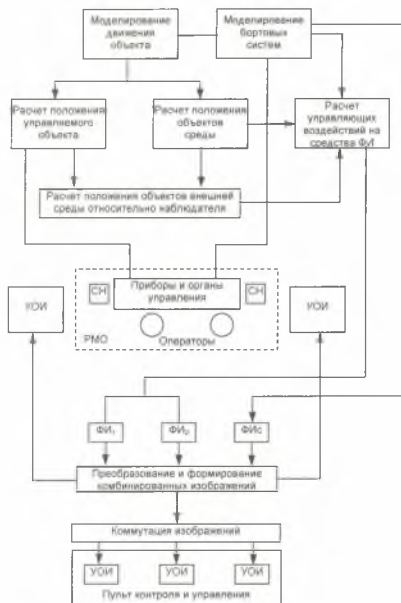


Рис. 10.1. Типовая структура системы имитации визуальной обстановки тренажера

ки, прицелы и символьная информация, формируемая бортовыми системами и бортовыми вычислительными комплексами. Для того чтобы обеспечить такую возможность в тренажере, в СИВО используются либо соответствующие штатные средства, либо специальные форми-

рователи символов (ФИС). После наложения этой информации на изображение внешней среды комбинированное изображение передается с помощью устройств отображения информации (УОИ) в средства наблюдения РМО и на ПКУ. Коммутация изображений, передаваемых

на ПКУ, позволяет инструкторам гибко маневрировать составом отображаемой информации, которая необходима им в данный момент для оценки ситуации.

В качестве устройств отображения информации в тренажерах используются видеомониторы, большие экраны и на- шлемные дисплеи. При использовании в качестве УОИ мониторов нередко возникает необходимость применять для согласования с СН специализированные устройства оптического сопряжения (УОС).

Все процессы должны быть жестко синхронизированы во времени для того, чтобы исключить рассогласование между отображаемыми сюжетами в разных средствах наблюдения и относительно показаний на бортовых приборах, индикаторах и дисплеях.

В зависимости от того, какие технические средства используются в составе СИВО, все методы генерации изображений можно разбить на три большие группы.

1. Оптико-механические.
2. Телевизионные.
3. Компьютерные.

В оптико-механических имитаторах изображение создается с помощью устройств, содержащих лишь оптические и механические узлы. Исходная информация о визуальной обстановке представлена в форме геометрически и оптически подобных моделей объектов или соответствующих им перспективных изображений (макетов, диапозитивов и т.п. устройств). Эффект движения моделируется взаимным перемещением элементов имитатора.

В телевизионных имитаторах, как правило, телевизионная камера формирует видеосигналы, соответствующие макету, рассматриваемому ею под определенным ракурсом и углом зрения. Эти сигналы поступают в тракт передачи и затем, после соответствующей обработки, на соответствующие телевизионные средства отображения.

В средствах компьютерной генерации изображений описание объектов и ландшафтов визуальной сцены хранится в базах данных на сервере окружающей среды. В процессе генерации изображения происходит обработка информации о трехмерных объектах, преобразование ее к виду, необходимому для формирования изображения на экране средств отображения.

Трудоемкость и стоимость построения СИВО, как правило, составляет не менее 30 % от объема затрат на создание тренажера (без учета стоимости РМО). Этот фактор становится особенно существенным при увеличении количества средств наблюдения (например, в космических тренажерах необходимо использовать одновременно до 6 каналов отображения визуальной информации), а также числа тренажеров, используемых для подготовки операторов. В связи с этим весьма острой становится проблема повышения экономичности и эффективности построения СИВО, в частности на основе использования принципов унификации и модульности, изложенных в гл. 4.

В качестве унифицированных модулей СИВО можно рассматривать типовые формирователи изображений, программные модули, реализующие алгоритмы расчета управляющих воздействий на типовые ФИ, унифицированные каналы коммутации и передачи изображений.

Рассмотрим, как решалась задача построения унифицированной модульной системы имитации коллективного пользования на примере централизованной системы имитации визуальной обстановки (ЦСИВО), которая создавалась в 1982–1984 гг. в составе тренажерного комплекса для подготовки космонавтов по программе ОК "Мир". Для первых космических тренажеров имитаторы визуальной обстановки создавались как уникальные единичные образцы, которые непосредственно сопрягались со средствами наблю-

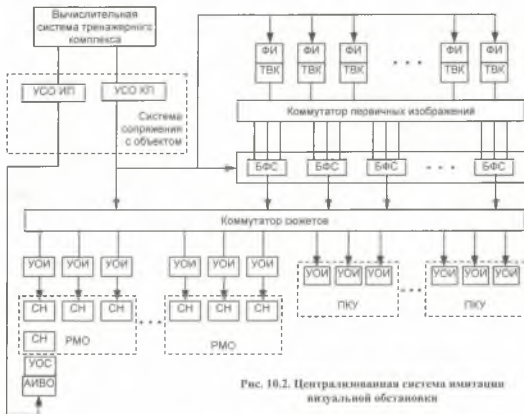


Рис. 10.2. Централизованная система имитации визуальной обстановки

дения, применительно к которым и производилась их разработка.

Первым шагом на пути к унификации было решение о создании трех базовых типов унифицированных оптико-механических имитаторов: унифицированных формирователей изображений космических аппаратов (управляемых носителей со сменными, выполненными в масштабе 1:33 моделями ПКА для имитации сближения и стыковки), унифицированных носителей земли и унифицированных формирователей изображений звездного неба.

Унифицированные формирователи планировалось использовать для целого ряда средств наблюдения как существующих, так и создаваемых в последующем космических аппаратов. Некоторые формирователи изображений имели мо-

дификации, ориентированные на приборы наблюдения с разным углом поля зрения.

Следующим шагом к созданию на базе унифицированных формирователей изображения системы коллективного пользования стало (рис. 10.2) введение телевизионной системы, которая позволяла осуществлять преобразование изображений и коммутацию телевизионных сигналов к различным пользователям. На каждом формирователе изображения была установлена телевизионная камера (ТВК), посредством которой изображение преобразовывалось в телевизионный сигнал.

Использование телевизионной системы существенно расширило системные и функциональные возможности комплекса. В частности, появилась возможность формирования типовых элементов изображения (солнце, луна, удаленный кос-

мический объект) отдельными относительно простыми электронными устройствами, формирования телевизионными средствами многокомпонентного составного сюжета (например, наблюдаемого стыкуемого объекта на фоне земли и звезд) из нескольких простых изображений, создаваемых отдельными модулями имитации визуальной обстановки и видеозаписи наблюдаемой и контролируемой обстановки, а также возможность ее использования для послетренировочного разбора и анализа действий экипажа в составе системы записи и воспроизведения тренировки. Стала возможной дистанционная передача изображения от первичных носителей к удаленным средствам наблюдения и другим терминальным устройствам, в том числе на учебно-командные пункты, пульта СУТ и др.

Для получения комбинированных изображений, формирование которых производится путем приоритетного суммирования нескольких элементарных изображений от отдельных ФИ, в составе ЦСИВО были разработаны специальные блоки формирования сюжетов (БФС). С помощью коммутаторов сюжетов видеосигналы соответствующих изображений передаются на устройства отображения информации (УОИ) тех средств наблюдения, которые в текущий момент используются при проведении тренировки.

Такое построение системы позволило существенно уменьшить число каналов формирования изображений. Если, например, оператор, выполняя некоторую задачу, последовательно переходит от одного прибора наблюдения к другому, то для обеспечения визуализации можно использовать один канал формирования изображения, переподключая его в момент перехода на соответствующее средство наблюдения. При этом одновременно в моделирующем комплексе активизируется программный модуль расчета управляющих воздействий для моделирования обстановки в новом средстве наблюдения, и его выходные сигналы адресуются через

устройства сопряжения коллективного пользования (УСО КП) на тот ФИ, который используется в соответствующем канале.

Для выполнения некоторых задач (например, при использовании прецизионных приборов) телевизионные средства не могли обеспечить требуемую точность и разрешение объектов в средствах наблюдения. В таких случаях сохранялось применение автономных имитаторов визуальной обстановки (АИВО), управляемых через УСО индивидуального пользования (УСО ИП); при необходимости использовались устройства оптического сопряжения (УОС) со средствами сопряжения.

Технические средства системы, показанной на рис. 10.2, наращивались поэтапно по мере ввода в эксплуатацию тренажеров, которые создавались по программе ОК "Мир" (см. гл. 16).

В период построения средств подготовки космонавтов для обеспечения программы МКС появились относительно дешевые компьютерные генераторы изображений, и возникла необходимость дальнейшего развития СИВО в новом тренажерном комплексе. Уровень унификации при использовании системы компьютерной генерации изображений (СКГИ) значительно повысился, так как теперь формирователи изображения могут формировать любое комбинированное изображение с учетом характеристик приборов наблюдения. Следовательно, в системе можно применять либо один тип ФИ, либо несколько ФИ, отличающихся мощностью (для построения сюжетов разных по сложности, либо по числу параллельно формируемых каналов визуализации). Исчезла необходимость использования телевизионных коммутаторов и блоков формирования сюжетов. Использование телевизионной системы в новых условиях ограничивается задачами имитации бортового телевидения, телевизионных средств наблюдения за экипажем и дублирования на ПКУ отдельных изображений.

Принятые принципы структурного построения комплекса допускают одновременное использование элементов старой и новой структуры, поэтому переход на новые более современные средства осуществлялся постепенно.

Таким образом, при построении тренажерного комплекса и тренажеров для подготовки космонавтов по программе МКС были в полной мере реализованы идеи построения унифицированных модульных систем и сохранены возможности предыдущего поколения систем имитации визуальной обстановки.

Оценивая перспективы дальнейшего развития структуры СИВО, необходимо учитывать две различные тенденции в построении современных систем.

1. В силу повышения возможностей и удешевления компьютерных средств можно идти по пути создания интеллектуальных терминальных устройств, устанавливая компьютерные генераторы изображений непосредственно вблизи закрепляемых за ними устройств отображения информации. При этом адресация управляющих воздействий будет осуществляться через средства вычислительной сети реального времени.

2. Сохраняя идеи централизации ресурсов можно при большом количестве тренажеров и каналов наблюдения использовать мощный сервер, на базе которого формировать множество необходимых сюжетов.

Предпочтительное использование того или иного варианта, по всей вероятности, будет определяться составом и задачами создаваемых комплексов подготовки операторов и экономическими оценками затрат с учетом создаваемой в настоящее время новой коммутационной аппаратуры и каналов быстрой передачи данных.

10.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИМИТАЦИИ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКИ

Как отмечалось в п. 10.2, первые поколения имитаторов визуальной обста-

новки строились на основе оптико-механических и оптико-телевизионных формирователей изображения. В качестве носителя изображения использовались управляемые физические макеты наблюдаемых объектов (взлетно-посадочной полосы, звездного неба, летательного аппарата и др.). Для имитации перемещения наблюдателя относительно объекта наблюдения обычно используется перемещение макетов объектов визуализации, например, путем размещения его в кардановом подвесе, а также перемещением телевизионной камеры, определяющей направление взгляда наблюдателя.

Формирователи такого типа использовались, в частности, в качестве имитаторов звездного неба для средств наблюдения космических тренажеров. Носителем изображения в них является графитовая шаровая поверхность, в которую впаены блестящие шарики – имитаторы звезд различных размеров. Шар подвешивается в управляемом трехступенном кардановом подвесе и в соответствии со значениями управляющих сигналов устанавливается в положение, соответствующее моделируемой ситуации. Изображение звезд проецируется на выходной зрачок с помощью коллимационного устройства рабочего места оператора в тренажере. Это же изображение передается на телевизионный монитор пульта контроля и управления тренировкой с помощью телекамеры, установленной в имитаторе.

В унифицированном формирователе изображений космического аппарата, использовавшемся для имитации стыковки, макет стыкуемого объекта располагался в четырехступенном кардановом подвесе на подвижной каретке, которая при имитации изменения расстояния до станции приближалась к наблюдателю. В некоторых имитаторах для моделирования сближения применялись варифокальные объективы и управление размером и положением раstra в телевизионном канале.



Рис. 10.3. Макет посадочной полосы и прилегающей местности

В имитаторах посадки летательного аппарата использовался макет посадочной полосы и прилегающей местности (рис. 10.3); изображение формировалось с помощью видеокамеры, закрепляемой в специальной конструкции, которая позволяла управлять положением камеры в соответствии с моделируемым положением летательного аппарата над местностью.

В настоящее время оптико-механические и оптико-телевизионные имитаторы применяются уже крайне редко. Появление систем компьютерной генерации изображений (СКГИ) позволило перейти к универсальному методу получения трехмерных сцен на основе компьютерного синтеза изображений.

В России первые профессиональные системы компьютерной генерации изображений разрабатывались в 70-х годах XX века Институтом автоматики и электротехники (ИА и Э) Сибирского отделения Академии наук СССР (система "Горизонт" для авиационных тренажеров и система "Аксай" для космических тренажеров). Система "Аксай" была весьма эф-

фективно использована при подготовке космонавтов к управлению автономным средством перемещения космонавта (АСПК) в открытом космосе для визуализации в тренажере "Дон-21КС", который создавало ОКБ "Орбита" в 1988 г. в составе тренажерного комплекса по программе ДОС "Мир".

В последующем в целях увеличения мощности, возможностей генераторов и качества формируемых изображений производилось постоянное совершенствование СКГИ. Для создания космических тренажеров был создан ряд новых систем: "Альбатрос" (1992 г. – для формирования изображения объекта стыковки, Земли и звездного неба в оптическом визире ВСК-4, бортовом телевизионном индикаторе КЛ-107 и блистере), "Ариус-3" (1998 г.), "Ариус-СТ" (1999 г.), "Альтаир" (1999 г.) и "Антарес" (1999 г.).

Мощный импульс для разработки новых СКГИ был дан при создании новых тренажеров российского сегмента МКС. Задачи формирования сюжетов визуальной обстановки в средствах наблюдения

тренажера служебного модуля были решены системой "Альтаир" [95]. Основное назначение четырехканальной СКГИ "Альтаир" – формирование изображений земной поверхности, так как экипажи должны проходить подготовку на тренажере и по визуально-инструментальным наблюдениям. В ходе этих наблюдений они должны визуально опознавать географическую местность, наблюдаемую в оптических средствах. Именно поэтому требования к изображению земной поверхности в приборах наблюдения здесь существенно отличаются от требований к другим аналогичным системам. С этой целью в визуальные модели земной поверхности были включены достаточно детальные снимки отдельных природных и техногенных объектов, позволяющие оператору производить многократное (до 10 раз) увеличение рассматриваемого объекта.

Первая система "Ариус-3" была промежуточной моделью на пути перехода от специализированных графических устройств к серийным устройствам широкого применения. В качестве генератора изображения использовалось оригинальное устройство на базе серийно выпускаемых программируемых цифровых сигнальных процессоров. Последующие образцы СКГИ были построены полностью на серийно выпускаемых устройствах. Указанные компьютерные генераторы изображений полностью удовлетворяют требованиям к полноте и качеству визуальной обстановки, которую необходимо воспроизводить в тренажерах.

При построении морских и авиационных тренажеров широкое применение находят системы визуализации фирмы ТРАНЗАС [119].

Система визуализации ТРАНЗАС позволяет получать детальное и реалистичное представление ландшафта, основанное на картографических данных с высокой плотностью объектового состава сцены, содержащей более 2000 объектов на

1 кв. км (без ограничений размера сцены) [119]. Особенностью системы является обширная текстурная и объектовая база данных, позволяющая моделировать разнообразие типов поверхности земли в различные времена года. При этом осуществляется моделирование различных состояний атмосферы (дождь, снег, туман, молнии) в различное время суток, слоистых и объемных кучевых облаков различной плотности, реалистичное отображение восходов и закатов, учет фазы Луны и затмений. Высокой степенью реализма отличается отображение водной поверхности: волнение, отражение объектов, блики, солнечные и лунные дорожки.

Для формирования сцен виртуального мира фирмой ТРАНЗАС используется инструментарий, который позволяет автоматически создавать элементы рельефа и объекты местности (горы, равнины, лес, озера, реки, населенные пункты, линии электропередач, автомобильные дороги с различным покрытием, железные дороги) и отображать на экране любой географический район.

По желанию заказчика сцена может быть дополнена неограниченным количеством статических объектов. В настоящее время база данных ТРАНЗАС насчитывает более 5000 виртуальных трехмерных объектов. Среди них большинство типовых сооружений, мостов, причалов, портового и аэродромного оборудования.

Для визуализации в тренажерах достаточно хорошее качество изображений дают современные системы компьютерной генерации изображений, имеющие следующие характеристики:

- разрешение – от 1024 × 768 и выше;
- глубина цвета – не менее 24 битов;
- дальность видимости – до 100 км;
- частота смены кадров – не менее 30 Гц;
- объектовая насыщенность сцены – до 30000 объектов в видимой зоне обзора.

Следует отметить, что технические и программные средства в области машин-

ной графики интенсивно развиваются, и в ближайшие годы можно ожидать появление высококачественных графических систем относительно невысокой стоимости.

Устройства отображения информации, сопрягаемые со средствами наблюдения оператора, являющиеся выходными устройствами в канале формирования изображения внешней визуальной обстановки. Наиболее часто в качестве средств отображения используются либо видеомониторы, либо проекционные системы, формирующие изображение на больших экранах.

В авиационных тренажерах и тренажерах наземного и речного транспорта, для которых характерно наличие широкой зоны обзора, традиционно используются проекционные системы, которые формируют изображения на одном или нескольких экранах. При этом наиболее эффективное решение задачи обеспечения полного обзора пространства достигается использованием системы телевизионных проекторов, проецирующих изображение неба, подстилающей поверхности, горизонта на экран, выполненной в виде замкнутой сферы (купола). Изображения проецируются на экран изнутри сферы. Вследствие больших габаритов и массы подобного экрана он применяется чаще для визуализации неподвижной кабины тренажера.

В частности, в системе визуализации тренажера самолета "Мираж-2000", разработанного в 1987 г. фирмой Thomson Training and Simulation (TTS) [122], изображение подстилающей поверхности и неба формировалось компьютерным генератором изображения Visa 4 фирмы Thomson и проецировалось на внутреннюю поверхность купола диаметром 12 м с помощью двух видеопроекторов, оснащенных сверхширокоугольными проекционными объективами типа "рыбий глаз". Поле обзора по горизонтали в такой системе составляет 360°. Для проецирования на внутреннюю поверхность купола

изображений четырех самолетов-целей используется дополнительно управляемая лазерная проекционная система MARS, которая обладает более высоким разрешением.

Другим примером купольной системы визуализации может служить устройство визуализации стенда, созданного на фирме Sikorski Aircraft Engineering. Система представляет собой жесткий экран сферической формы (купол) диаметром 6 м, выполненный из композиционных материалов. Экран вместе с размещенным внутри него рабочим местом единственного пилота вертолета размещен на шестистепенной подвижной платформе. Изображение визуальной обстановки проецируется на внутреннюю поверхность купола тремя расположенными над головой пилота цветными светоклапанными видеопроекторами "Talaria" фирмы General Electric.

Система с тремя видеопроекторами обеспечивает воспроизведение трех изображений, образующих единую картину с угловыми размерами 180° (3 × 60°) по горизонтали и 80° по вертикали (на 30° выше и на 50° ниже горизонтальной плоскости, в которой располагаются глаза пилота). Глаза пилота расположены на удалении 3 м от экрана с изображением, что позволяет создавать иллюзию глубины пространства. При количестве оптических точек в изображении видеопроектора 640 × 480 угловой размер одного элемента изображения составляет 7,5'. Для того чтобы увеличить разрешение воспроизводимого изображения, систему дополнили устройством контроля положения головы оператора, и сигналы от этого устройства использовались для управления видеопроектором, проецируя изображение с более высоким разрешением на то место экрана, к которому повернута голова пользователя в данный момент времени ("область внимания" пользователя).

В проекционных системах, создаваемых в России фирмой ТРАНЗАС, используется экран сферической формы, кото-

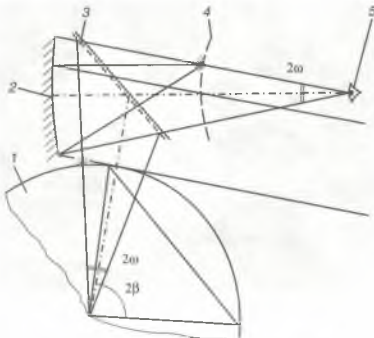


Рис. 10.4. Оптическая схема имитатора звездного неба

рый обеспечивает угол обзора 180° по горизонтали и 60° по вертикали. Это обеспечивает хорошую зону видимости для всех членов экипажа. При увеличении числа проекторов имеется возможность увеличения углов обзора до 225° по горизонтали и до 90° по вертикали, что позволяет обзирать пространство внизу. Проекционный экран имеет модульную сборную конструкцию, что обеспечивает быстроту и легкость монтажа. Жесткий каркас экрана позволяет использовать экран на подвижной платформе. Экран имеет усовершенствованное светоотражающее покрытие, обеспечивающее наилучшую четкость и контрастность изображения при любых углах зрения.

В более простых тренажерах в целях экономии изображение визуальной обстановки можно выводить на один проектор с экраном, либо на монитор.

Мониторы преимущественно используются для отображения визуальной

обстановки в специальных приборах наблюдения и в иллюминаторах. В целях достижения более высокого уровня подобия следует применять специальные устройства оптического сопряжения. Особенно значительный эффект достигается при использовании коллиматоров, благодаря тому, что с их помощью глаза оператора при рассмотрении сюжетов фокусируются на бесконечно большое расстояние. Это способствует формированию у оператора иллюзии глубины имитируемого внекабинного пространства.

На рис. 10.4 показана оптическая схема имитатора звездного неба, реализуемая специальным устройством – коллиматором. Носителем изображения является шар 1 с нанесенными на его поверхность сферическими отражателями света, имитирующими звезды. Глаз наблюдателя 5 расположен в центре кривизны сферического зеркала полного отражения 2.



Рис. 10.5. УОС тренажера транспортного космического корабля

Благодаря светоделительной пластине 3 пучки света от подсвеченных точечным источником света звезд, находящихся на поверхности шара, направляются на сферическое зеркало 2 и, отражаясь от него, становятся параллельными друг другу. Наблюдатель видит поверхность звездного неба в фокальной плоскости 4.

На рис. 10.5 и 10.6 показан внешний вид устройств оптического сопряжения, которые применялись в космических тренажерах транспортного корабля и орбитальной станции.

В России оптические коллимационные устройства (ОКУ) изготовлялись Ленинградским оптико-механическим объе-



Рис. 10.6. УОС тренажера орбитальной космической станции

динением им. Урицкого (ЛОМО), Пензенским конструкторским бюро моделирования (ПКБМ) и ООО "Астрасим" (Украина).

ОКУ производства ООО "Астрасим", выполняемые в прочном жестком корпусе, отличались достаточно хорошими характеристиками, но имели значительную массу (около 500 кг).

ОКУ производства ПКБМ, которые разрабатывались для визуализации кабин тренажеров пассажирских и транспортных самолетов, имели массу менее 200 кг (в сборе с 24-дюймовым монитором) благодаря облегченному корпусу, использованию тонкой светodelительной пластины и сферического вогнутого зеркала из полиметилакрилата.

Последние годы в качестве устройств отображения информации о внешней визуальной обстановки все более широко используются наשלменные стереосистемы, которые получили применение в качестве средств погружения пользователя в синтезируемый трехмерный мир. В наשלменных дисплеях (Head Mounted Displays – HMD) видеоинформация отображается на двух небольших экранах, располагаемых вместе с оптической системой непосредственно перед глазами пользователя. Генераторы изображений формируют отдельную картину для правого и левого глаза с учетом имитируемого положения пользователя в пространстве.

Формирование стереоскопических изображений существенно повышает качество восприятия визуальной картины. Такое изображение позволяет пилоту, в частности, ощущать глубину пространства, уверенно оценивать высоту полета или зависания над землей. Поэтому в отдельных видах тренажеров будут находить широкое применение проекционные стереосистемы.

Для того чтобы воспроизвести стереоизображение на одном экране, используется либо временное разделение, когда

на одном и том же экране поочередно воспроизводятся изображения для восприятия одним, а затем другим глазом пользователя, либо поляризация световых потоков, которые формируются двумя проекторами, причем плоскости поляризации потоков, излучаемых этими проекторами, перпендикулярны друг к другу. Обучаемого пилота снабжают легкими поляризационными очками без оправы или на штатный шлем наклеивают поляризационные светофильтры.

Еще одно возможное направление в построении системы имитации внешнего мира – создание системы виртуальной реальности с применением многопроекционной системы.

Примером создания такой системы является проект CAVE, в котором предлагается использовать конструкцию из четырех экранов: три просветных экрана для стен и один отражающий экран для пола [161]. Наблюдатель виртуального мира находится внутри объема и имеет очки с затворами для стереоскопического зрения и шестикординатный датчик для фиксации его положения в пространстве. Ситуация моделируется с учетом перемещения наблюдателя, а генераторы изображений проецируют на все стены согласованные стереоскопические изображения, соответствующие данной ситуации. Для интерактивного взаимодействия с виртуальным миром используется трехмерный манипулятор.

Вопросы применения в тренажерах управляемых генераторов изображений и технологий виртуальной реальности более подробно излагаются в гл. 13.

Совокупность средств программного обеспечения СИВО включает в себя общее (ОМО) и специальное (СМО) математическое обеспечение.

Общее математическое обеспечение представляет собой системные средства организации вычислительного процесса и базируется на применении используемой

в тренажере системной среды (например тренажерноориентированной оболочки, описанной в п. 8.3). В составе ОМО используются также библиотеки стандартных прикладных программ.

Специальное математическое обеспечение включает в себя программные модули расчета управляющих воздействий на формирователи изображений (расчета положения отображаемых объектов в пространстве относительно наблюдателя), а также программы формирования выходных изображений в устройствах отображения информации.

Наиболее значительный объем задач, связанных с формированием изображений, необходимо решать при использовании компьютерных генераторов изображений.

В отличие от оптико-механических и оптико-телевизионных систем визуализации в системах компьютерной графики источником входной информации являются не физические объекты (макеты), а их математические модели. СКГИ осуществляет синтез изображения на основе числовых характеристик, параметров и зависимостей, отражающих пространственную форму, структуру и оптические свойства отображаемых объектов.

Для обеспечения генерации изображений СМО должно содержать средства формирования геометрических моделей, базы данных этих моделей в памяти компьютера и средства формирования сюжета в устройствах отображения в реальном масштабе времени. В большинстве компьютерных генераторов изображений используется полигональный способ описания объектов, т.е. в качестве основного элемента изображения принимается плоская грань. Процесс создания изображения состоит из последовательности вычислительных процедур, называемой 3D-конвейером; этот конвейер включает две основные фазы: геометрическую обработку и растеризацию [95].

База данных СКГИ формируется в зависимости от области деятельности операторов с учетом задач, решаемых обучаемыми; она должна включать все объекты, которые могут попадать в поле зрения оператора (сооружения и здания, посадочные площадки, летательные аппараты, элементы ландшафта, дорожные покрытия и транспортные средства, солнце, горизонт земли и другие самые различные объекты).

Алгоритмы формирования изображений должны предусматривать моделирование облачности и тумана, дыма, пыли, а также тех визуальных эффектов, которые могут возникнуть в реальных условиях (солнечной засветки приборов наблюдения, бликов, теней и т.д.). Для повышения реалистичности изображений в СКГИ широко используются текстуры и различные методы их обработки.

10.4. УЧЕТ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИВО

Человек-оператор воспринимает окружающий мир при помощи своих сенсорных систем. Восприятие пространства заключается в восприятии формы, размеров и взаимного расположения объектов, их рельефа, удаленности и направления, в котором они находятся [20].

В инженерной психологии восприятие определяется как процесс отражения в сознании человека предметов или явлений при их непосредственном воздействии на органы чувств, в ходе которого происходит упорядочение и объединение отдельных ощущений в целостные образы предметов и событий.

В сенсорной системе можно выделить рецепторную, проводящую и центральную компоненты. Сенсорная система начинает работать, когда какое-либо явление окружающей среды (раздражитель) воспринимается чувствительными

клетками – первичными сенсорными рецепторами. В каждом рецепторе воздействие раздражителя преобразуется в электрохимические сигналы – импульсы, которые по нервным проводящим путям передаются в сенсорный центр мозга. Частота импульсов, число и типы возбужденных рецепторов характеризуют интенсивность раздражителя и размеры воспринимаемого объекта.

Дальнейшие обработки и анализ сигналов осуществляются как в нервной, так и в мозговых структурах, формируя суждение о воспринимаемом событии.

Зрительный анализатор является одной из наиболее важных информационных систем человеческого организма (до 90 % всей информации об окружающем мире), обеспечивая предметное видение, т.е. восприятие пространства и окружающих предметов человеком [2, 138]. Входным сигналом для системы зрительного анализатора является световой поток, определяемый оптическими характеристиками объектов внешней среды. В результате преобразований входного сигнала эти объективные характеристики отражаются субъективно во всей их совокупности и целостности, что и составляет суть процесса зрительного восприятия.

Как следует из произведенного выше описания средств имитации визуальной обстановки, к числу технических характеристик, которые определяют качество проектируемых систем визуализации, относят разрешение, адекватность условий по интенсивности и глубине цвета, частоту формирования кадров, объективную насыщенность сцены и др. Количественные значения этих параметров должны определяться с учетом особенностей зрительного анализатора человека, в том числе, чувствительности зрительного анализатора, характеристик цветового и сумеречного зрения, поля зрения, остроты зрения, критической частоты предъявления информации и т.д.

С точки зрения количественной оценки параметров, которые учитываются при выборе технических решений, связанных с построением СИВО в тренажерах, следует в первую очередь рассматривать энергетические, пространственные и временные характеристики зрительного анализатора [28, 101, 102].

К основным энергетическим характеристикам относится яркость изображения (яркость излучательных экранов мониторов или отражательных экранов), чувствительность, яркий контраст и цветоощущение. Основной оптический параметр изображения – энергия сигнала; в ощущениях она воспринимается как яркость (интенсивность светового потока). Диапазон чувствительности глаза к этому параметру чрезвычайно высок ($10^6 \dots 10^8$ кд/м²).

При выборе яркостных характеристик средств визуализации необходимо учитывать характер решаемых операторами задач. Например, при выполнении космонавтами задачи ориентации существенную роль играет освещенность земной поверхности. В зависимости от времени суток (день, сумерки, ночь) она составляет $10^4 \dots 1,05 \cdot 10^5$ лк. Даже при нахождении в тени космические аппараты имеют подсветку отраженным от поверхности Земли светом.

В общем случае в системах отображения можно рекомендовать принимать следующие яркостные характеристики: для ночных условий 0,005 ... 0,01 кд/м²; в сумеречных условиях 0,01 ... 10 кд/м²; в дневных – 10 ... 600 кд/м². При расчете световых характеристик следует учитывать ослабление светового потока, обусловленного использованием в каналах наблюдения оптических устройств сопряжения и средств наблюдения. Например, интегральное пропускание поляризационного светофильтра составляет всего 12 ... 15 % [90].

Освещенность экранов (отношение светового потока к площади экрана) рекомендуется выбирать в диапазоне 100 ... 250 лк.

Дифференциальный порог чувствительности зрительного анализатора к изменению яркости относительно невысок (глаз различает 100 ... 150 уровней яркости). Поэтому при построении черно-белых изображений разрядность памяти можно выбирать относительно невысокой (до 8 разрядов). При определении контрастности максимальным допустимый перепад яркости рекомендуется выбирать не более 1 : 100.

В системах имитации визуальной обстановки в тренажерах преимущественно используются цветные системы отображения информации (за исключением имитации штатных черно-белых систем). Цветное изображение позволяет увеличить контрастность и разрешающую способность изображения, повысить вероятность обнаружения и распознавания цели.

Важность и уровень качества цветного представления информации в значительной степени определяется решаемыми задачами. Например, исследования функции цветового зрения в условиях космоса показали заметное снижение субъективной яркости наблюдаемых космонавтами цветов (в среднем на 25 %). Однако цветовые признаки объекта стыковки служат дополнительным источником информации данной задачи, решаемой визуальными средствами, и имеют важное значение для формирования зрительного образа орбитальной станции. Яркостные и цветовые признаки обладают наибольшей информативностью при визуальной селекции в процессе поиска и обнаружения объекта стыковки.

Цветовая чувствительность глаза существенно зависит от яркости и размеров изображений. Человек способен различать до 10^7 оттенков. Цвета природных образований сосредоточены в области голубых, желто-зеленых, оранжево-красных и серых тонов со сравнительно невысоким коэффициентом отражения (0,05 ... 0,2) и малой контрастностью (менее 30). Насыщенность цвета большин-

ва наземных объектов не превышает 10 ... 20 %, и лишь для некоторых из них достигает 40 ... 50%.

В основе построения цветных систем отображения информации лежит система аддитивных цветов, при использовании которой каждая точка изображения формируется смешением трех компонентов красного, зеленого и синего (R,G, B) цвета. Учитывая высокую цветовую чувствительность зрения человека, в технических системах высокого качества реализуется возможность кодировать не менее 16 млн. цветов. Поэтому разрядность видеопамати в современных системах принимается либо 24 (8 битов для кодирования каждой составляющей цвета), либо 32.

Рассматривая при построении СИВО пространственные характеристики зрительного анализатора, необходимо в первую очередь учитывать остроту зрения и поле зрения оператора. Под остротой зрения понимается минимальное расстояние между двумя точками, при котором они воспринимаются раздельно. Острота зрения связана со способностью оператора видеть объекты на большом расстоянии, различать такие детали, как направление, скорость перемещения, геометрическую форму и расположение объекта в пространстве. Поэтому характеристики формирователей изображения и средств наблюдения должны соответствовать возможностям человека-оператора.

Острота зрения выражается в угловых единицах. Абсолютный порог остроты зрения составляет 0,3 ... 0,5'. Обычно в расчетах это значение принимается равным 1'. Простые геометрические расчеты показывают, что при таком разрешении в плоскости, расположенной на расстоянии 60 см от глаза наблюдателя, расстояние между двумя соседними точками, отображаемыми на экране, должно быть не более 0,2 мм. Это значит, что, например, при ширине экрана 20 см строка формируемого качественного изображения должна содержать не менее 1000 адресую-

мых точек. Поэтому в современных видеосистемах рекомендуется выбирать разрешение не ниже 1024×768 . При отображении визуальной обстановки на больших экранах в зависимости от характеристик проекционной аппаратуры, размеров экрана и расстояния до него разрешение, как правило, находится в пределах $1,5 \dots 7'$.

При моделировании движения необходимо принимать во внимание, что порог восприятия движения человеком составляет $1 \dots 2^\circ$ при наличии фиксированной точки отсчета и $15 \dots 20^\circ$ – при отсутствии неподвижных предметов вблизи движущегося объекта.

Поле зрения оператора определяется углами обзора окружающего пространства. Принято различать три зоны, отличающиеся степенью детальности воспринимаемой информации:

1. Зона центрального зрения (она соответствует желтому пятну на сетчатке глаза). В ее пределах глаз воспринимает предметы наиболее четко. Поле зрения этой зоны составляет от $1,5$ до 7° .

2. Зона ясного видения ($30 \dots 35^\circ$). В ее пределах предметы опознаются, но детали воспринимаются хуже. При желании рассмотреть предметы более детально человек направляет ось глаза таким образом, чтобы интересующий его предмет попал в зону центрального зрения.

3. Зона периферийного зрения ($75 \dots 90^\circ$). В ее пределах предметы обнаруживаются, но плохо опознаются. Однако движение предметов в этой зоне воспринимается достаточно хорошо.

Указанные параметры учитываются обычно при определении объема отображаемого при визуализации пространства (в частности, количества и размеров экранов, на которые проецируется визуальная обстановка). Кроме этого, с учетом указанных особенностей зрительного анализатора строятся более экономичные системы, в состав которых включаются дат-

чики, фиксирующие направление взгляда наблюдателя. В направлении взгляда (в зоне центрального зрения) изображение генерируется в СКГИ с более высокой детальностью, а в зоне периферийного зрения используется описание объектов с меньшей степенью детализации.

При оценке временных характеристик зрительного анализатора рассматриваются такие параметры, как латентный период (задержка в появлении ощущения после предъявления образа), время инерции ощущения (период времени от момента исчезновения сигнала до момента прекращения зрительного ощущения; он составляет $0,2 \dots 0,5$ с), время адаптации (приспособления к условиям освещенности) и критическая частота мельканий. Инерционные характеристики зрения связаны с тем, что световые ощущения происходят в результате фотохимических процессов, и они возникают не мгновенно при действии света, а в течение некоторого промежутка времени. Глаз замечает изменения яркости поля, если они происходят не очень быстро.

Учет указанных свойств зрительного анализатора важен в связи с тем, что практически все средства визуализации формируют изображение как последовательность сменяющих друг друга кадров и частота смены этих кадров имеет принципиальное значение.

Инерционные свойства зрения позволяют человеку после превышения некоторого значения частоты формирования кадров (*критической частоты мельканий*) воспринимать процесс как непрерывный. Экспериментально определено, что при возбуждении глаза прямоугольными световыми импульсами с одинаковой шириной импульса и паузы критическая частота $f_k = 45 \dots 50$ Гц для средней яркости наблюдаемого поля в интервале $12,7 \dots 26$ кд/м². Периферическое зрение

имеет большую величину критической частоты, чем центральное. В связи с этим частота кадровой развертки в мониторах принимается 50...70 Гц.

В компьютерных генераторах изображений частота формирования новой сцены (нового изображения, отличного от предыдущего) может быть взята меньше

указанной. Практика показывает, что человек воспринимает дискретность в изменении положения объектов на экране, если частота формирования нового изображения становится меньше 25 Гц. С учетом этого осуществляется выбор мощности СКГИ, объем сцены и степень детализации описания объектов этой сцены.

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ В ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

11.1. ИМИТАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ, АКСЕЛЕРАЦИОННЫХ И ТАКТИЛЬНЫХ ОЩУЩЕНИЙ В ТРЕНАЖЕРАХ

Основной объем информации, которую использует оператор при управлении объектом, поступает к нему по каналу зрительного анализатора. Однако кроме приборной и визуальной информации в реальном процессе на оператора воздействует ряд других факторов: перегрузки, акустические шумы, вибрации, линейные и угловые ускорения, а в отдельных случаях, изменение температуры, давления, влажности, газового состава среды. Эта дополнительная информация, поступающая человеку от внешней среды по каналам слухового вестибулярного и тактильного анализатора, позволяет оператору производить более полную оценку своего положения в пространстве, ощущать резкие изменения в поведении управляемого объекта, относительноном положении и влиянии других объектов, перемещение и воздействие которых должен учитывать обучаемый оператор.

Таким образом, влияние факторов внешней среды в некоторых ситуациях повышает эффективность работы оператора при управлении динамическим объектом; в других случаях (например, при перегрузках) эти факторы оказывают негативное дестабилизирующее влияние, затрудняя эффективное выполнение решаемых операторами задач.

Необходимость воспроизведения указанных факторов в тренажерах зависит от характера операторской деятельности и решаемых на тренажере задач, от значимости и интенсивности факторов внешней

среды и от степени их влияния на возможное привитие ложных навыков или на снижение эффективности управления. Например, для обучаемых пилотов самолетов весьма важно воспроизведение акселерационных ощущений, возникающих при изменении высоты, выполнении фигур высшего пилотажа или других маневров. Для пилота вертолета необходимо имитировать вибрации, килевую качку, вращение, проваливание, боковое, продольное и вертикальное перемещения. При моделировании перемещения наземного транспортного средства (автомобиля или боевой машины) следует воспроизводить влияние рельефа поверхности, качку, заносы, влияние сил инерции при торможении и разгоне. При подготовке космонавтов для отработки отдельных задач важно воспроизводить перегрузки и условия невесомости.

Для тех видов деятельности, которые связаны с силовым воздействием оператора на органы управления, особенно если усилие зависит от параметров моделируемых условий, в тренажере используют систему имитации усилий, регулируемых таким образом, чтобы они соответствовали моделируемой ситуации.

В процессе принятия решения о целесообразности имитации акселерационных ощущений следует иметь в виду, что латентный период (время с момента начала воздействия до момента возникновения ощущения) вестибулярного аппарата в несколько раз меньше, чем у зрительного анализатора. Таким образом, если на тренажере отсутствует система подвижности, имитирующая акселерационные ощущения, то оператор в тренажере будет позже, чем в реальной системе воспринимать

информацию и реагировать на резкие динамические воздействия внешней среды, что может стать причиной неполной адекватности поведения человека на тренажере и реальном объекте. Этим, в частности, можно объяснить тот факт, что при переходе курсанта с тренажера на реальный самолет на первых этапах при пилотировании наблюдается эффект перерегулирования (например, слишком резкий набор высоты при взлете).

При моделировании различных факторов реальной деятельности оператора особенно важно не допустить рассогласования их воздействия на анализаторы человека во времени. Незначительные рассогласования могут вызывать дискомфорт, а значительные – приводя к потере ориентации и возможности адекватного реагирования на возникающую ситуацию.

Для имитации факторов внешней среды используется достаточно широкий арсенал технических средств, однако следует иметь в виду, что использование имитаторов, как правило, существенно увеличивает стоимость тренажера. Поэтому часто для отработки навыков в условиях воздействия факторов внешней среды используются либо специализированные тренажеры, либо специальные стенды, барокамеры и лаборатории.

11.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Система имитации акустических шумов (СИАН) позволяет существенно повысить уровень адекватности моделируемых на тренажерах ситуаций, так как слуховой анализатор является вторым (после зрительного) по степени важности фактором, влияющим на восприятие внешней среды.

Звуковой анализатор нередко является основным источником информации о большей части событий, происходящих во внешней среде. Если, например, зрительный анализатор воспринимает только те события, которые происходят в поле зре-

ния оператора, то слуховой позволяет фиксировать все события в пространстве, сопровождающиеся звуковыми эффектами, и направление, в котором расположены их источники (первичный – круговой; опознание и распознавание – зрительным анализатором).

В процессе работы на реальном объекте оператор слышит шумы работающей аппаратуры управляемого объекта (двигателей, переключателей, звуковой сигнализации и др.) и объектов внешней среды (например, попутных и встречных автомобилей, механическое соприкосновение с дорожным покрытием и другими внешними телами). Изменение интенсивности, направления и характера звука дает оператору дополнительную информацию, на основании которой он делает заключение о нарушении нормальной работы аппаратуры, о появлении вблизи новых объектов, которые являются источниками звуков, об их положении и направлении перемещения.

На тренажерах обычно имитируется работа каналов разговорной связи операторов между собой и с центрами управления. При этом целесообразно воспроизводить возникающие в реальных условиях шумы и помехи в каналах связи.

При моделировании акустической обстановки следует принимать во внимание характеристики слухового анализатора человека. Рассмотрим основные параметры физических процессов, которые важны для имитации акустической обстановки.

Как известно, звук – это волновой колебательный процесс, распространяющийся в упругих средах (газах, жидкостях и твердых телах) и вызывающий слуховые ощущения. Человек воспринимает звуковые колебания в диапазоне от 15 до 20 000 герц. Для хранения и передачи звук с помощью микрофона преобразуется в электрический сигнал, который изменяется во времени в соответствии с мощностью (амплитудой) и звуковым тоном исходно-

го сигнала. При воспроизведении динамик преобразует электрический сигнал в звуковое давление.

Если звуковая аппаратура основана на использовании цифровой техники и, в частности, компьютерной обработки звука, электрический сигнал, соответствующий фиксируемому звуковому образу, должен быть преобразован в дискретную форму. При этом производится дискретизация двух параметров, определяющих функцию звукового сигнала: квантование по уровню сигнала и квантование по времени.

Квантование по уровню осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя, который ставит в соответствие текущим значениям сигнала последовательность двоичных чисел, которые можно запоминать и обрабатывать (корректировать, накладывать другие звуки и т.д.).

Квантование во времени заключается в том, что ввод и запоминание текущих значений сигнала производится не постоянно, а в фиксированные моменты времени, т.е. с некоторым заданным тактом.

От частоты дискретизации и разрядности аналого-цифрового преобразователя в решающей степени зависит точность и качество фиксируемого звукового сигнала. В соответствии с законом Найквиста самая высокая частота воспроизведения равна половине частоты дискретизации. Потому с учетом особенностей человеческого восприятия звука в качественных звуковых системах частота дискретизации принимается равной 44,1 кГц (44100 измерений в секунду).

Наибольшая дифференциальная чувствительность восприятия силы звукового раздражителя слуховым анализатором наблюдается в диапазоне частот 500 ... 5 000 Гц. При частоте 1000 Гц человек воспринимает (в диапазоне от порога слышимости до болевого ощущения) 270 ... 300 градаций громкости сигнала. Поэтому для обеспечения качественного стерео-

звучания обычно используют два канала преобразования звукового сигнала с разрядностью 16 бит каждый.

При воспроизведении речевых звуков рекомендуется применение аппаратуры с характеристиками: интенсивность звука 0 ... 65 дБ; диапазон частот 100 ... 8000 Гц. Для удовлетворительного восприятия речи уровень ее громкости должен превышать уровень шума примерно на 6 дБ.

Благодаря восприятию звука одновременно двумя анализаторами человек обладает способностью пространственной локализации источника звука. Пространственная локализация источников звука осуществляется за счет разной интенсивности сигналов, поступающих на правое и левое ухо, разницы во времени прихода сигналов (разность в 30 ... 40 мс создает впечатление смещения источника на 2 ... 3°) и сдвига фазы сигналов, поступающих в оба уха.

При необходимости повышенной точности моделирования акустической обстановки следует учитывать законы распространения звука (отражение и преломление на границах различных сред, дифракцию звука, его рассеивание при наличии препятствий и неоднородностей в среде и на границах раздела сред).

Основными элементами СИАШ являются генераторы звука, коммутационная, микширующая, звукоусилительная аппаратура и акустические системы.

В качестве генераторов звука можно использовать либо магнитофонные устройства с записанными звуковыми эффектами, либо электронные синтезаторы звука. В связи с интенсивным развитием компьютерной техники последний вариант находит преимущественное применение. Современные цифровые сигнальные процессоры звуковых плат и специализированные программные приложения позволяют осуществлять профессиональное воспроизведение до 64 аудиоканалов с 24-битным цифроаналоговым преобразованием и частотой дискретизации 96 кГц.

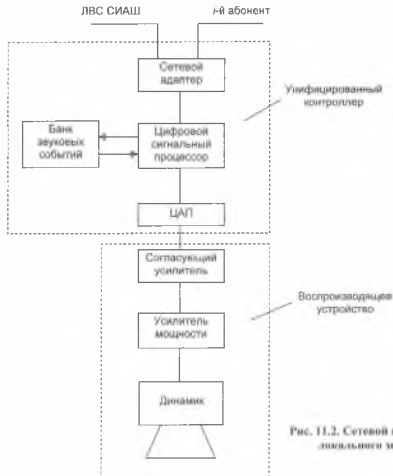


Рис. 11.2. Сетевой имитатор локального звука

лении диапазона звуковых частот на подполосы, удаления части подполос, выборе оптимального уровня шума и использовании маскирующего эффекта (использования при дискретизации меньшей разрядности при большей громкости звука). Этот метод позволяет сжимать объем аудиоинформации в 5–10 раз.

Для воспроизведения моделируемых звуковых событий можно применять два альтернативных подхода:

а) применение сетевых имитаторов локального звука (СИЛЗ) (рис. 11.2), которые можно рассматривать как выходные устройства соответствующих моделей, имитирующих отдельные источники

шума (работу двигательной установки, релейные переключатели, шум дороги, выстрелы и др.);

б) формирование общего звукового поля с помощью современных интегрированных многоканальных акустических систем, например, на основе формата "7.1", предусматривающего использование семи каналов с полным частотным диапазоном (три динамика (D_i) звука впереди, два боковых и два сзади) и одного низкочастотного канала (с диапазоном 3 ... 120 Гц).

В многоканальной системе реализация алгоритмов синтеза требуемых акустических образов может осуществляться

на базе сигнального процессора для звуковых плат и программного пакета EAX Advanced HD 4.0. Этот программный продукт позволяет имитировать пространственную звуковую картину с учетом влияния удаленных сред (например, в автомобильном тренажере имитацию приближающегося туннеля), плавно изменять параметры реверберации (что позволяет изменять звуковую картину при движении источника в пространстве), имитировать прямое распространение звука и многократно отраженные волны.

Выбор того или иного способа построения СИАШ в конечном счете определяется количеством источников звука, требований к точности локализации звуковых эффектов и требований к полноте и качеству воспроизведения акустической обстановки.

11.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСЕЛЕРАЦИОННЫХ ОЩУЩЕНИЙ

Для моделирования таких факторов внешней среды, как толчки, удары, линейные и угловые ускорения, вибрации и перегрузки, в составе тренажера создается система имитации акселерационных ощущений (СИАО).

Акселерационные ощущения воспринимаются тактильными анализаторами, вестибулярным аппаратом человека и его соматическими системами, в частности, системой кровообращения. Основная информация о положении человеческого тела относительно общего вектора сил, угловых и линейных скоростях движения головы поступает оператору с помощью специального органа чувств – вестибулярного аппарата. Вестибулярный аппарат обеспечивает также сохранение равновесия человеком в пространстве.

Восприятие динамических воздействий вестибулярным аппаратом осуществляется с помощью специфических сенсорных анализаторов человеческого организма: отолитового аппарата и полукружных каналов. Отолитовый аппарат можно

рассматривать как гравитационно-инерционный датчик, который на основе фиксации рецепторными клетками смещения отолитовой мембраны анализатора осуществляет анализ поступательного движения, а также направления силы тяжести [33].

Первичный анализ вращательного движения обеспечивается системой полукружных каналов вестибулярного аппарата. Фиксация углового перемещения в каждом из трех полукружных каналов (в фронтальной, горизонтальной и вертикальной плоскостях) происходит вследствие смещения (в результате перемещения) эндолимфы, воздействующей на подвижную перегородку (купулу) и связанные с ней рецепторные клетки нерва. После прекращения воздействия купула, выведенная из равновесия толчком эндолимфы, под действием собственной упругости медленно (приблизительно за 20 с) возвращается в исходное состояние, смещая эндолимфу в направлении своего возврата.

В центральной нервной системе сопоставляется информация, полученная от разных анализаторов. При этом имеет место сложное многоуровневое взаимодействие акселерационных анализаторов со зрительной, мышечной и другими системами организма. На рис. 11.3 приведена в качестве примера схема управления пилотированием самолета, отражающая влияние вестибулярного анализатора на управление динамическим объектом [167].

Во время полета изменяется положение анализаторов в связи с маневрами летательного аппарата и отклонениями головы и тела летчика. На каждый полукружный канал воздействует своя проекция вектора углового ускорения (ϵ), а в плоскости соответствующего отолита действует проекция результирующего ускорения вектора тяжести и действующих на управляемый объект сил ($g-a$).

Реакция центральной нервной системы на возбуждение ориентированной мат-



Рис. 11.3 Структурная схема управления пилотированием самолета

рицы вестибулярных рецепторов используется для оценки состояния, стабилизации положения тела и направления взгляда оператора. На уровне вестибулярных и глазодвигательных нервных ядер образуется рефлекторная дуга, по которой возникает вестибулярный нистагм, используемый для стабилизации определенного направления глаз при отклонениях головы.

Кроме указанных анализаторов информацию о месте, направлении и величине переменных усилий, действующих на тело оператора, формирует тактильный (кожный) анализатор с помощью системы механорецепторов кожных покровов. Этот анализатор обеспечивает восприятие прикосновения, а также тепла, холода и вибрации. Тактильное ощущение появляется при деформации кожи под давлением внешнего воздействия. Ощущение возникает только в момент деформации и исчезает, как только изменение деформации прекращается. Абсолютный порог чувствительности к силе раздражителя зависит от места его приложения, скорости движения и функционального состояния рецептора.

При создании системы управления имитаторами возникает задача генерация такого движения стенов, при котором

внешние силы, действующие на решето, приводили бы к таким же реакциям, что и при реальном движении. Такие задачи называют задачами динамической имитации [56]. Путем разложения вектора перегрузки на составляющие, задачу динамической имитации можно рассматривать как композицию следующих трех задач [15]:

- имитацию квазистационарной перегрузки при ограничениях на угловые ускорения (изменение общего вектора сил);
- имитации относительных угловых колебаний;
- имитации быстроменяющегося линейного ускорения.

Решение первой и второй задач позволяет моделировать реакцию полукружных каналов вестибулярной системы. Решение третьей задачи имитации движения обеспечивает адекватную реакцию отолитового аппарата вестибулярной системы.

Вводя расчетную точку j , совпадающую с центром масс оператора, вычисление матрицы n_{0j} проекций вектора перегрузки в рассматриваемой точке на связанную с объектом управления систему координат можно представить в следующем виде [81]:

$$n_{0j} = \ddot{n}_0 + X_0 \ddot{n}_0 \left[\frac{1}{|g|} R_j X_0 + \frac{1}{|g|} W_0 \right]$$

где $\ddot{n}_0$ – матрица-столбец проекций вектора перегрузки в расчетной точке при квазистационарном движении объекта; X_0 – матрица-столбец проекций вектора малого поворота связанной системы относительно квазистационарной системы; W_0 – матрица-столбец проекций вектора быстроменяющихся линейных ускорений расчетной точки в проекциях на связанные оси; R_j – кососимметрическая матрица, соответствующая радиусу-вектору рассматриваемой точки.

Для воспроизведения указанной модели в тренажеростроении используются различные способы построения имитаторов акселерационных ощущений, в том числе, многостепенные динамические платформы подвижности, кардановы подвесы, центрифуги и динамические кресла с тактильными имитаторами.

Наибольшее распространение получили трех- и шестистепенные динамические платформы опорного типа. В таких имитаторах кабина (РМО) крепится (рис. 11.4, см. цветную вставку) в конечных узлах трех или шести гидроцилиндров, вторые концы которых закрепляются на неподвижном основании. Изменением длины выдвигаемых штанг гидроцилиндров достигается требуемое положение кабины и ее перемещение в пространстве. В силу ограниченности свободного хода цилиндров (1...2 м) система позволяет воспроизводить кратковременное ускорение в соответствующем направлении, после чего кабина возвращается в нейтральное положение со скоростью, меньшей порога чувствительности рецепторов человека.

Для расчета управляющих воздействий используются данные, описывающие движение объекта ($X_0, \dot{X}_0, \ddot{X}_0, \ddot{n}_0, W_0$), которые поступают от модели движения. В целях предотвращения запаздывания, возникающего в результате отработки

имитирующих движений следящим приводом платформы, вначале (в текущий момент времени t_k) для выработки воздействий осуществляется экстраполяция (прогноз) движения объекта на интервале t_{np} .

Как правило, экстраполяция производится на интервале времени $[t_k, t_k + t_{np}]$ с помощью интерполяционных многочленов третьей степени с использованием значений переменных, описывающих динамику объекта в предыдущие моменты времени. Далее в алгоритме расчета управляющих воздействий предусматривается определение новых координат платформы и соответствующих значений длин цилиндров $l_i, \dot{l}_i, \ddot{l}_i$ ($i = 1, \dots, 6$) с учетом перекрестных связей движения по различным направлениям и приоритетов компонент быстрой составляющей перегрузки. Рассчитанные значения подаются на следящие приводы гидроцилиндров.

Использование гидропривода позволяет обеспечивать высокие динамические характеристики имитаторов и плавность перемещений за счет малого статического трения. В то же время последние годы в имитаторах акселерационных ощущений часто используются электромеханические приводы. Оригинальное решение данной проблемы предложено, в частности, при создании тренажеров транспортных средств специалистами Южно-Российского государственного технического университета. Разработанная система подвижности представляет собой платформу, снабженную опорными элементами на воздушной подушке, которая устанавливается на полу с гладким покрытием и обеспечивает линейное продольное и поперечное перемещение РМО. В центральной части платформы установлена стойка с карданным шарниром крепления рамы. На верхней части платформы предусмотрено место для установки стойки с механизмами поворота относительно продольной и поперечной осей.

Движение платформы осуществляется с помощью шарико-винтовых передач. Опорные элементы на воздушной подушке обеспечивают возможность движения по сложной траектории в плоскости с коэффициентом сопротивления не более 0,005. В нижней части платформы по продольной оси расположен узел крепления шарико-винтовой передачи механизма разгона. Все вибрационные нагрузки в вертикальной плоскости создаются с помощью рычажного механизма, приводимого в движение двигателем постоянного тока с шарико-винтовой передачей.

Система подвижности позволяет моделировать сложное перемещение установленной на ней кабины в соответствии с профилем дорожной поверхности, в том числе, разгон, торможение, заносы на повороте, подъем и спуск, движение по косогору; имитацию сложных синусоидальных колебаний машины, происходящих от систематических и случайных возмущающих сил. Такая система может найти эффективное применение в автомобильных, морских и железнодорожных тренажерах.

В качестве альтернативного варианта имитации акселерационных ощущений можно рассматривать построение стендов, ориентированных на информационную компенсацию отсутствующих акселерационных воздействий. В настоящее время разработаны различные схемы "динамических" кресел, в которых воздействие перегрузок на оператора воспроизводится через тактильные ощущения путем натяжения привязных ремней и созданием давления в специальных пневматических камерах, встроенных в сиденье и спинку кресла [15].

Оригинальное построение такой системы предложено специалистами ПО "Эра" (г. Пенза) для использования в авиационных тренажерах [81]. Суть решения состоит в том, что кресло летчика, установленное в неподвижной кабине, содержит неподвижный каркас с закреп-

ленным на нем типовым комплектом ремней, а также подушки сиденья и спинки, закрепленные каждая на устройствах перемещения. Устройства перемещения выполнены в виде шестистепенных динамических стелов, которые обеспечивают перемещение подушек на расстоянии до 3 см в любом направлении от нейтрального положения.

При использовании данной системы обеспечивается достаточно высокая точность имитации перегрузок за счет обеспечения независимого тактильного воздействия на верхнюю и нижнюю половины тела по шести степеням свободы.

Для решения задач динамической имитации широко используются также имитаторы с кардановым подвесом, которые так же, как многоступенчатые подвижные платформы, обеспечивают необходимую ориентацию кабины и воспроизведения ускорений в произвольном направлении пространства. Одним из классических вариантов реализации кинематической схемы имитатора с кардановым подвесом является центрифуга.

Консоль центрифуги может вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через один конец консоли. На другом конце находится карданов подвес. Внешнее кольцо карданова подвеса может вращаться вокруг продольной оси консоли. Во внешнем кольце, перпендикулярно к его оси вращения расположена ось вращения внутреннего кольца. Во внутреннем кольце перпендикулярно к оси его вращения находится ось вращения платформы с кабиной. Кабина предназначена для установки рабочего места оператора или специального исследовательского оборудования.

Основным преимуществом центрифуги, как средства имитации акселерационных ощущений, является возможность имитации длительно действующих ускорений и перегрузок в наземных условиях. Перегрузки возникают в результате резких маневров самолета, а также при вые-

дения космического корабля на орбиту (4G) и спуска космического корабля с орбиты (около 6G). При этом перегрузка определяется равнодействующей негравитационных сил – силы тяги и силы аэродинамического сопротивления. Отношение этой величины к величине g (ускорение свободного падения тел $g = 9,81 \text{ м/с}^2$) называется коэффициентом перегрузки или просто перегрузкой. Проблема влияния перегрузок на организм человека посвящены многие исследования. В них изучались характер и степень выраженности реакций организма человека при различных параметрах ускорений, устанавливались пороги переносимости, выявлялись основные механизмы расстройств, изыскивались средства и методы повышения устойчивости организма к перегрузкам.

В зависимости от направления действия сил по отношению к вертикальной оси тела человека различают продольные и поперечные перегрузки.

Продольные перегрузки от головы к ногам принято называть положительными, а от ног к голове – отрицательными. Поперечные нагрузки имеют направления: "спина-грудь", "грудь-спина" и "бок-бок" (боковые).

Перегрузки характеризуются величиной, продолжительностью, градиентом нарастания и спада, направлением по отношению к той или иной оси тела, а их переносимость – индивидуальными особенностями организма. Величина переносимой человеком перегрузки тем больше, чем короче время ее действия, а воздействие перегрузки в поперечном направлении к оси тела переносится легче, чем в продольном.

На базе центрифуги производится оценка устойчивости организма к действию ускорения по различным критериям. В связи с этим различаются границы "выживаемости" и пределы физиологической устойчивости, оцениваемой по начальным признакам нарушений деятельности раз-

личных функциональных систем организма.

Одна из самых больших центрифуг в мире – центрифуга ЦФ-18 – была изготовлена шведской электротехнической фирмой ASEA и расположена в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина. Это уникальное инженерное сооружение с 4-мя степенями свободы имеет следующие технические характеристики:

- радиус вращения центра массы кабины – 18 м;
- максимальная перегрузка – 30 ед.;
- максимальный градиент – 5 ед./с;
- масса вращающихся частей – более 300 т;
- давление в кабине – регулируемое в пределах – 40 ... 800 мм рт. ст.;
- газовый состав в кабине – регулируемый: O_2 до 40 %, N_2 до 83 %, CO_2 до 4 %;

- относительная влажность в кабине – 30 ... 70 %;

- одновременный съем медицинской информации – по 60 каналам.

Ферма ЦФ-18 установлена непосредственно на роторе двигателя постоянного тока номинальной мощностью 6 МВт. Кабина центрифуги помещена в карданов подвес, что обеспечивает ориентацию вектора перегрузки в любом направлении.

Общий вид центрифуги ЦФ-18 показан на рис. 11.5 (см. цветную вкладку). В РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина этот комплекс используется для решения следующих задач подготовки операторов:

- формирования навыков правильного поведения операторов в условиях воздействия комплекса факторов, имитирующих условия реального полета;
- формирование навыков и умений выполнения некоторых рабочих операций программы полета на этапах спуска и посадки в условиях воздействия перегрузок;
- поддержание адекватной психологической реакции на воздействие штатной перегрузки;
- клинко-физиологических обследований;

- испытания образцов техники;
- проведение экспериментов и исследований.

Для контроля за состоянием космонавта во время тренировки на центрифуге имеется медико-физиологический комплекс. Сигналы с датчиков и электролов, закрепленных на теле космонавта, предварительно усиленные и преобразованные, передаются через 4 группы вращающихся контактных устройств на регистраторы и осциллографы пульта врача. С помощью телекамеры, установленной в кабине, на монитор пульта врача передается изображение лица космонавта.

Помимо подготовки космонавтов на центрифуге ЦФ-18 проводятся специальные исследования и испытания космического и авиационного оборудования в условиях воздействия перегрузки. Другой важной задачей, решаемой на центрифуге, является экспертиза летчиков-истребителей ВВС. При этом они подвергаются воздействию перегрузки 5G, а летчики-истребители 4-го поколения 6 G в направлении "голова-таз".

На базе центрифуги ЦФ-18 создан уникальный тренажер динамического спуска транспортного корабля "Союз" с орбиты. Двухместная кабина тренажера закреплена в кардановом подвесе и имеет 3 степени свободы. Благодаря такой подвеске вектор перегрузки может быть ориентирован в любом направлении.

Разработанный программный комплекс обеспечивает адекватное воспроизведение моделей движения спуска и системы управления спуском (СУС), а также управление приводами центрифуги для имитации перегрузки. Модель движения включает систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение ПККА вокруг центра масс, движение центра масс с учетом модели возмущенной атмосферы, характеристик тормозной двигательной установки, аэродинамических характеристик, геометрических параметров двигателей стабилизации, на-

чальных углов наклона орбиты и углов направления вектора скорости. Управление траекторией корабля осуществляется регулированием аэродинамических сил путем изменения угла крена.

В режиме ручного управления спуском (РУС) управляющий угол крена формируется оператором по информации, отображаемой на дисплее пульта космонавта, и посредством ручки управления спуском передается в аппаратуру управления угловым движением.

Этапы спуска и посадки являются наиболее сложными в общей структуре управления ПККА. Работа космонавтов на этих этапах сопровождается значительным эмоциональным напряжением и происходит в условиях быстро меняющейся динамической информации, поступающей как с внутрикабинной, так и с внекабинной среды в ограниченном режиме времени.

Особые требования к операторским возможностям космонавтов возникают при ручном управлении спуском ПККА с орбиты после длительного пребывания в условиях невесомости и возникновении аварийных ситуаций в полете. Моделирование такого режима в наземных условиях осуществляется на центрифуге ЦФ-18 посредством создания определенной ориентации вектора перегрузки и избыточного давления на нижнюю часть туловища оператора. В этом случае его сердечно-сосудистая система функционирует в режиме, характерном для невесомости. По достижении адаптации сердечно-сосудистой системы к этим условиям оператор подвергается перегрузкам, значение которых соответствует условиям спуска ПККА с орбиты.

Такая методика позволяет приблизить условия тренировок операторов к условиям возвращения ПККА с орбиты, увеличить надежность ручной системы управления и повысить безопасность космических полетов.

11.4. МЕТОДЫ ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ

Тело, свободно и поступательно движущееся под влиянием одних лишь сил тяготения (т.е. при отсутствии внешних поверхностных сил, в том числе сил сопротивления среды, реакции опоры или подвеса), всегда находится в состоянии невесомости [89]. В состоянии невесомости находятся космический корабль в мировом пространстве, падающий лифт (при обрыве троса), человек, совершающий прыжок (между моментом отрыва от Земли и моментом приземления; сопротивлением воздуха при этом можно пренебречь).

Профессионально с невесомостью сталкиваются космонавты, выполняющие полеты на ПКА, и летчики, выполняющие определенные маневры на самолетах.

В невесомости отсутствует столь привычное в нашей повседневной жизни проявление сил притяжения. Космонавт находится в безопасном состоянии; он не будет давить на кресло, в котором сидит, висячая лампа не будет натягивать шнур и т.п. В космическом полете невесомость является одним из основных специфических факторов, который накладывает особые требования на организацию профессиональной деятельности космонавта.

Практика освоения космического пространства показала выраженную индивидуальность реакций организма человека на воздействие невесомости.

Кроме того, при моделировании необходимо также иметь в виду причинно-следственную связь и зависимость в переносимости ряда последовательно воздействующих условий космического полета. Например, первичные физиологические реакции на невесомость опосредствованы через предшествующее взаимодействие перегрузок при выведении корабля, а физиологические реакции при воздействии перегрузок на заключительном этапе полета опосредуются через предшествую-

щее взаимодействие невесомости.

Поэтому развитие средств и способов моделирования условий космического полета должно идти как по пути максимального воспроизведения специфических условий для различных этапов полета, так и по пути их воспроизведения в динамической последовательности.

Так перегрузки, предшествующие невесомости при выведении корабля, воздействуют на человека в оптимальном для переносимости положении, т.е. под углом $78...80^\circ$ к продольной оси тела.

При таком положении продольная составляющая равна примерно 20 % от суммарно действующей величины перегрузки. Естественно, что организм включает комплекс физиологических реакций, направленных на ее компенсацию.

С позиций классической физиологии безусловные компенсаторно-приспособительные реакции в ответ на изменение окружающей среды включаются или выключаются с некоторым запаздыванием (если, конечно, не задействована условно-рефлекторная сфера). Исходя из этих позиций, можно полагать, что при выходе ПКА на орбиту искусственного спутника Земли и прекращения действия перегрузок безусловно-рефлекторные реакции компенсации продольной составляющей выключаются с некоторым отставанием, что создает предпосылки для "гемодинамического толчка" в направлении к голове.

Именно с указанным гемодинамическим толчком следует связывать возникающие в начальный период воздействия невесомости иллюзии кувура, опрокидывания спинки кресла, перевернутого вниз головой положения и др. Поэтому последовательное воздействие перегрузок при выведении ПКА и невесомости на орбите следует рассматривать не только как связь событий во времени, но и как связь в определенной мере детерминированную в том смысле, что гемодинамический толчок в направлении к голове, обусловленный сменой перегрузки на не-

сомость, является одним из пусковых моментов, обуславливающих рассогласование в деятельности афферентных систем, координирующих пространственную ориентировку и провоцирующих появление иллюзий, что в конечном счете не безразлично для развития и течения многих физиологических процессов в начальный период адаптации (деадаптации) к невесомости.

В настоящее время основными способами имитации невесомости в наземных условиях является выполнение полета на самолете по параболической траектории, использование гидроневесомости и системы обезвешивания.

Полеты на самолетах по параболической траектории (параболе Кеплера) являются одним из специфических видов профессиональной подготовки космонавтов. В медицинском аспекте ознакомительно-тренировочные полеты на летающей лаборатории выполняются с целью ознакомления кандидатов в космонавты с особенностями влияния невесомости на организм, определения и повышения устойчивости к факторам параболического полета, исследования психофизиологических реакций при оценке работоспособности, ознакомления с особенностями пространственной ориентировки в безопорном пространстве, с методами перемещения и фиксации своего тела и бортового оборудования.

Этот метод основан на принципе сведения к нулю сил гравитации за счет сил инерции. В РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина в качестве самолетов-лабораторий для воспроизведения условий невесомости используются самолеты ИЛ-76 МДУ, специально доработанные для выполнения полетов с воспроизведением режимов невесомости. При полетах самолетов по параболической траектории состояние невесомости продолжается в течении 22 ... 24 с. В одном полете самолетом-лабораторией может быть воспроизведено до 20 режимов невесомости.

Полеты с воспроизведением режимов невесомости выполняются на высоте 6000 ... 9000 м, в условиях, когда верхний край облачности не превышает высоту 6000 м. При достижении высоты 6500 м и приборной скорости 620 км/ч самолет вводится в кабрирование с перегрузкой $n = 2$. Данная перегрузка выдерживается постоянной.

При достижении приборной скорости 500 км/час или угла тангажа 45° самолет вводится в режим невесомости, для чего создается перегрузка $n = 0$ и выдерживается затем постоянно небольшими отклонениями руля высоты.

При достижении на нисходящей ветви траектории приборной скорости 470 км/ч или угла тангажа 40° самолет выводится из снижения, для чего создается перегрузка $n = 2$, и она выдерживается постоянной для достижения угла тангажа 0° .

После этого самолет выводится в горизонтальный полет. Продолжительность горизонтального полета самолета до следующего маневра составляет не более 3 мин; за это время производится дозаправка топливных и масляных аккумуляторов.

Схема маневра самолета для достижения невесомости представлена на рис. 11.6.

В профессиональном плане малая длительность воспроизведения невесомости данным методом не позволяет произвести в этих условиях некоторые продолжительные операции. Кроме того, наличие перегрузок до и после создания невесомости и относительно высокая стоимость полетов не позволяют широко использовать данный метод для отработки операций в реальном масштабе времени. По этим причинам полеты по параболической траектории в настоящее время широко используются для полземленной отработки ряда операций, на выполнение которых не требуется большой длительности пребывания в условиях невесомости.

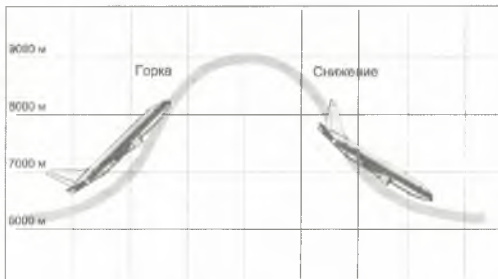


Рис. 11.6. Схема маневра самолета для достижения невесомости

На рис. 11.7 (см. цветную вкладку) показана тренировка космонавтов в самолете-лаборатории по перемещениям в безопорном пространстве.

В медицинском аспекте полеты на невесомость целесообразно планировать после циклов вестибулярных тренировок и тренировок в антиортоположении. При таком подходе предварительная тренировка организма космонавтов к вестибулярным нагрузкам и перемещающимся перераспределениям крови по длинной оси тела позволяет повысить эффективность функционирования компенсаторно-приспособительных механизмов многократного воздействия невесомости и перегрузок.

Одним из наиболее распространенных и эффективных способов моделирования невесомости следует считать имитацию невесомости в гидросреде. Этот способ основан на помещении объектов космической техники и космонавта в скафандре в гидробассейн и придании им нейтральной плавучести, безразличного равновесия и безопорного состояния. Он

обладает рядом существенных преимуществ перед другими: время моделирования невесомости практически не ограничено; размещение макетов ПКА возможно в натуральную величину; стоимость работ относительно невелика. В гидросреде отработываются: циклограммы внекорабельной деятельности, методики монтажно-сборочных и ремонтных работ, трассы перемещений экипажа, способы транспортирования грузов и конструкций, меры безопасности экипажа.

Особенность моделирования движения объекта в гидросреде – действие сил, определяемых высокой плотностью и инерционностью воды. В космосе силы такой природы отсутствуют, поэтому при ускорениях объекта в гидросреде необходимо приводить в движение некоторую массу воды и преодолевать гидродинамическое сопротивление среды. Поддержание постоянной скорости движения объекта в воде также связано с затратами энергии, тогда как в космосе такое движение осуществляется без действия тяги, поскольку на объект не воздействуют тормозящие силы сопротивления среды.



Рис. 11.8. Скафандр "Орлан-ДМА"

Можно отметить, что силы сопротивления, которые определяются формой, размерами и качеством поверхности, пропорциональны квадрату скорости объекта, движущегося в воде, и ее плотности. Кроме того, при ускоренном или замедленном движении объекта на него начинают действовать инерционные силы воды. Их действие проявляется как влияние дополнительных масс при поступательном движении, а также как дополнительный момент инерции масс воды.

Таким образом, достоверность воспроизведения движения космического

объекта под водой зависит от того, насколько точно будут имитироваться инерционные свойства объекта (масса и момент инерции) и насколько снижено влияние гидродинамических сил и моментов.

По мнению специалистов фирмы General Electric и специалистов РГНИ-ИЦПК им. Ю.А. Гагарина, исследовавших вопросы моделирования невесомости в гидросреде, в общем случае достоверность моделирования может быть достигнута, если будет осуществляться компенсация воздействия гидродинамических



Рис. 11.9. Скафандр "Орлан-ДМА-ГН"

сил и моментов и факторов инерционности среды или учет их воздействия с использованием аналитических методов [159], а также будут обеспечиваться перемещения с шестью степенями свободы, соответствие размеров макета размерам космического объекта, воспроизведение необходимой силы тяжести или полной невесомости, массы и момента инерции космического объекта.

Для проведения испытаний и тренировок космонавтов в условиях гидросреды применяются скафандры "Орлан-ДМА-ГН", конструкция которых аналогична конструкции штатного изделия "Орлан-ДМА". Изделие "Орлан-ДМА" (рис. 11.8) представляет собой полужесткий скафандр. Корпус кирасы и шлем вы-

полнены из металла как одно целое, а "руки" и "ноги" – из мягкой оболочки.

На скафандре "Орлан-ДМА-ГН" установлена система грузов, при помощи которых достигается нулевая плавучесть системы человек–скафандр. Система грузов включает в себя: постоянные грузы, установленные в нижней части изделия; два съемных нагрудных груза, оперативные грузы, устанавливаемые в специальных карманах поясной части скафандра, сзади в карманах на каждой штанине. Скафандр "Орлан-ДМА-ГН" показан на рис. 11.9.

Исследования влияния конструктивных различий скафандра типа "Орлан" в условиях гидроневесомости и открытого космоса показывают, что от конструктив-



Рис. 11.10. Фрагмент работы космонавтов в гидросреде в скафандрах "Орлан-ДМА-ГН"

ных особенностей и условий работы зависят физиологические характеристики оператора.

Главное различие заключается в том, что скафандр "Орлан-ДМА-ГН" работает в водной среде и имеет большую массу, чем скафандр "Орлан-ДМА", что сказыва-

ется на работоспособности оператора, снаряженного в него, так как возрастают физические затраты для перемещения большей массы. В земных условиях оператор, снаряженный в скафandre "Орлан-ДМА-ГН", самостоятельно перемещаться не может. В условиях космоса система

человек-скафандр находится в невесомости. В условиях гидросреды сказывается "опорность" воды, хотя при малых скоростях движения (до 0,5 м/с) этим можно пренебречь. Это свойство воды влияет также на различное положение шлангов во время работы под водой.

Большое значение имеет правильная подгонка и балансировка скафандра. В воде оболочки скафандра намокают, что приводит к изменению антропометрических характеристик и плавучести системы человек-скафандр, а изменение положения оператора, снаряженного в скафандр "Орлан-ДМА-ГН", головой вниз вызывает у него прилив крови к голове и большие неудобства при выполнении рабочих операций, в невесомости это не сказывается.

В условиях гидроневесомости на оператора, снаряженного в скафандр "Орлан-ДМА-ГН", кроме атмосферного давления, оказывают влияние избыточное давление внутри скафандра и давление столба воды соответственно глубине погружения.

Во время работы оператора в скафандре "Орлан-ДМА-ГН" в гидросреде на его зрительный анализатор заметное воздействие оказывает преломляющее свойство воды. Сразу после погружения в воду предметы кажутся маленькими и далекими. Операторы при этом допускают много лишних движений и промахов (ошибок).

Неблагоприятное воздействие на оператора, снаряженного в скафандр "Орлан-ДМА-ГН", оказывает шум воздуха, выходящего из скафандра, и высокий уровень громкости связи. Все это увеличивает нагрузку на оператора. На рис. 11.10 показан фрагмент работы операторов в гидросреде.

Анализ работы операторов в условиях открытого космоса показывает, что большинство выполняемых операций относится к весьма тяжелой работе. Энергозатраты достигают при этом 7 ккал/мин.

Сравнение результатов выполнения операций в космосе и гидросреде показы-

вает, что при работе в гидросреде возникают дополнительные нагрузки на оператора, которые вызваны несколькими факторами. Один из них определяется необходимостью крепить на скафандр грузы для создания нулевой плавучести безразличного равновесия. Другим фактором является влияние гидродинамических и инерционных сил массы жидкости, а также изменение плавучести системы человек-скафандр, связанное с гидростатическим давлением, меняющимся на глубине. Воздействия этих факторов передаются через скафандр на человека.

Также необходимо отметить, что существует еще ряд факторов, оказывающих влияние на достоверность воспроизведения в гидросреде условий работы в открытом космосе. Основными факторами являются: в общем случае несовпадение центра масс и центра объема системы человек-скафандр в невесомости и гидроневесомости; различие в рабочих позах, принимаемых космонавтом в невесомости и гидроневесомости; давление в скафандре, используемом при работе в гидроневесомости, выше, чем в космическом скафандре; различие температуры в скафандре; различный состав воздуха для дыхания; дополнительные вращательные моменты, связанные с изменением плавучих объемов.

Воздействие этих факторов увеличивает затраты энергии при выполнении работ в условиях гидроневесомости. Следовательно, при анализе результатов испытаний в гидроневесомости необходимо учитывать энергозатраты, идущие на преодоление дополнительных нагрузок, наличие гидродинамических сил, действующих на систему человек-скафандр, и ограничения скафандра, накладываемые на подвижность человека. Пример возможной модели учета воздействия на оператора дополнительных факторов показан на рис. 11.11. Такая модель основывается на выделении типовых движений космонавта в открытом космосе и их ана-

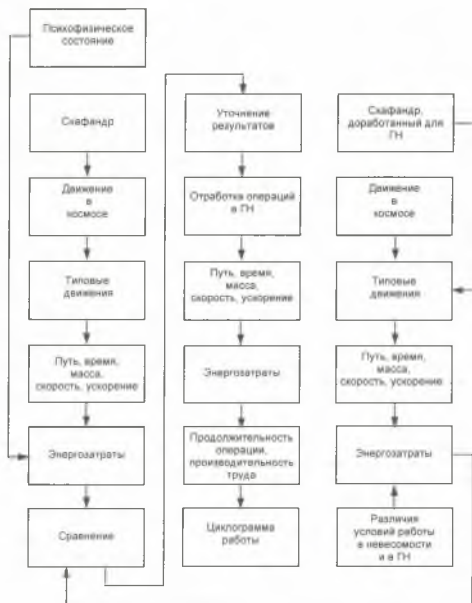


Рис. 11.11. Модель учета воздействия дополнительных факторов на оператора при ВКД

лизе с учетом влияния ограничений, накладываемых скафандром. По результатам анализа и с учетом психофизиологической напряженности измеряются энергозатраты человека.

Аналогично исследуются те же характерные движения в гидроневесомости, только в этом случае учитывается влияние скафандра, доработанного применительно к гидросреде, и влияние гидродинамиче-

ского и инерционного воздействия среды. Далее с учетом различий работы в невесомости и гидроневесомости измеряются энергозатраты при проведении операций в гидроневесомости.

Модель предусматривает сравнение и уточнение результатов и уже с учетом полученной разницы и ее количественного определения по величине энергозатрат производится отработка планируемых космических операций, связанных с работой человека в открытом космосе.

По замеренным в процессе испытаний энергозатратам определяются продолжительность операций в космосе и производительности труда космонавта, на основе результатов строится циклограмма работы при проведении конкретных работ.

Сопоставление и анализ различных подходов к имитации невесомости в земных условиях показали целесообразность использования также систем активного обезвешивания для испытания объектов космической техники и длительных тренировок космонавтов в штатных скафандрах с применением различного электрического оборудования.

Основная задача, стоящая перед тренажерами такого типа, – обеспечить возможность тренировать космонавтов в штатных скафандрах в условиях безопорного пространства. Для этого в состав тренажера входит система автоматической компенсации сил сопротивления горизонтальных и вертикальных перемещений стенда обезвешивания скафандров.

На рис. 11.12 показан общий вид системы электромеханического обезвешивания скафандров "Орлан-ДМА", предназначенной для тренировки космонавтов на земле по шлюзованию из орбитальной станции (ОК "Мир", МКС).

Общий подход к построению системы автоматической компенсации сопротивления горизонтальным перемещениям в тренажере, обеспечивающей обезвешивание

скафандров, заключается в решении задач синхронного движения точки подвеса с помощью управляемого привода так, чтобы канат располагался строго вертикально во всем диапазоне изменения скорости и ускорения объекта обезвешивания.

Общий подход к построению системы вертикального перемещения в тренажере, обеспечивающего обезвешивание космонавта в скафандре, заключается в создании с помощью управляемого электропривода компенсирующих силовых воздействий, равных весу объекта.

Указанный способ имитации невесомости использован при создании тренажера внекорабельной деятельности "Выход-2" (см. п. 15.3). В составе этого тренажера учеными и специалистами Южно-Российского государственного технического университета (г. Новочеркасск) была создана система обезвешивания тренажерных скафандров на базе использования устройства на воздушной подушке [104–106].

В состав системы обезвешивания входит эстакада и мостовая конструкция с подвеской линейного асинхронного двигателя (ЛАД), по которой перемещается тележка в горизонтальной плоскости. На тележке крепится система вертикального перемещения скафандра, включающая механизм подъема, системы управления и электроснабжения.

Система подвеса обеспечивает свободное перемещение объекта обезвешивания (оператора в скафандре) массой $m_{тр}$. На оператора действует внешняя сила F , состоящая из двух компонент: горизонтальной составляющей силы натяжения каната – F_k и силы сопротивления воздуха $F_{с.гр}$. Взаимодействие объекта обезвешивания и тележки происходит за счет канатной подвески длиной L , меняющейся при работе системы вертикального перемещения. Тележка массой m_t описывается в виде двух последовательно соединенных интегрирующих звеньев, а также состав-



Рис. 11.12. Общий вид системы обезвешивания скафандров "Орлан-ДМА"

ляющих сил сопротивления: силы сухого трения $F_{\text{тр}}$ и силы, пропорциональной скорости $F_{\text{св}}$. Кроме того, на тележку действует горизонтальная составляющая силы натяжения каната – $F_{\text{кв}}$, а также сила тяги ЛАД – $F_{\text{лв}}$.

В качестве привода используется асинхронный линейный двигатель, индуктор которого закреплен на тележке, а вторичный элемент в виде стальной пластины

с медной накладкой закреплен на мосту. Применение ЛАД упрощает конструкцию привода, исключая люфты и силовые потери в редукторе, а также обеспечивает равномерное усилие при движении. Однако, сила тяги ЛАД зависит не только от напряжения питания $U_{\text{лв}}$, но и от возмущающих факторов: скорости движения, величины воздушного зазора между индуктором и вторичным элементом, температуры ЛАД.

Сигнал управления приводом формируется регулятором, который обеспечивает устойчивость следящей системы и монотонный характер переходного процесса. Сложность управления обусловлена наличием двух масс $m_{тг}$ и m_r , связанных квазиупругой связью через канат и чрезвычайно низкими потерями при движении объекта обезвешивания (практически только сопротивление воздуха). Частота собственных колебаний системы меняется в широких пределах из-за изменения длины каната L . Кроме того, в канале моста в процессе движения изменяется приведенная масса, зависящая от положения тележки на мосту.

Для нормального функционирования системы необходимо, чтобы скатывающая сила $F_{ск}$, возникающая за счет неидеальной горизонтальности поверхности, не превышала значения остаточного сухого трения $F_{тр}$.

Для обеспечения строго вертикального подвеса каната во всем диапазоне скоростей и ускорений в зоне движения объекта обезвешивания используется следящая система, которая включает в себя тензометрический датчик отклонения подвеса от вертикали, линейный электропривод, механизм перемещения и регулятор. Тензометрический датчик закреплен на тележке, т.е. угол отклонения каната от вертикали измеряется в точке крепления.

Исследования устройств следящей системы активной компенсации сил сопротивления в горизонтальной плоскости показали, что определяющими в качестве имитации перемещения в невесомости являются приведенные погрешности датчика отклонения, усилителя и блока регулятора.

В системе введена отрицательная обратная связь по углу подвеса каната. Наличие в контуре управления интегрирующего звена устраняет статические ошибки регулируемой величины. Поэтому любые погрешности при измерении угла отклонения каната от вертикали, связанные с

погрешностью установки монтажного угла датчика, дрейфа нуля измерительных усилителей, появление наклона тележки относительно горизонта приведут к нежелательному постепенному перемещению объекта обезвешивания при отсутствии внешней силы.

Чтобы устранить этот недостаток, в систему введен нелинейный элемент с зоной нечувствительности, которая должна превышать совокупную величину этих погрешностей настройки системы. При отсутствии существенной внешней силы и неподвижном объекте приводной двигатель остается выключенным, а наличие остаточного трения исключает самопроизвольное перемещение объекта обезвешивания. Принятое построение следящей системы практически полностью устраняет взаимное влияние каналов мота и тележки, а также влияние на их работу системы вертикального перемещения при совместном движении.

Разработанная система обезвешивания позволяет осуществлять вертикальные (до 2 м) и горизонтальные (до 1,8 м) перемещения космонавта со скафандром общей массой 240 кг [35].

Широкое применение находит способ обезвешивания конструкций и человека в скафандре с помощью легких газов, например, гелия. Газом заполняются баллоны, прикрепленные к элементам конструкции, что позволяет легко их перемещать с помощью манипулятора или непосредственно человеком. К недостаткам способа следует отнести заметную громоздкость обезвешивающих конструкций, существенные ограничения по перемещениям оператора.

Преимущества и недостатки способов моделирования невесомости показывают, что на практике невозможно ограничиться одним из них. Только разумное сочетание различных методов моделирования позволяет решить весь комплекс проблем, связанных с влиянием невесомости.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИРОВКАМИ В ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ

12.1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИРОВКАМИ

В процессе организации и проведения тренировок можно выделить три основных этапа (рис. 12.1): подготовка тренировки, непосредственное проведение тренировки на базе тренажера и послетренировочный анализ.

В свою очередь, подготовка тренажера к проведению тренировки включает в себя процессы инженерной и методической подготовки. Целью инженерной подготовки является включение и проверка работоспособности (тестирование) технических и программных средств тренажера, а также конфигурирование, установление и проверка связей между всеми взаимодействующими компонентами (модулями), которые должны обеспечивать его работу.

Методическая подготовка заключается в уточнении сценария (плана проведения тренировки), определении начального состояния объекта (установка исходных значений параметров моделируемых процессов или выбор варианта из заранее подготовленной базы данных) и в определении программы поведения объектов внешней среды в той или иной ситуации, которая может возникнуть в процессе проведения тренировки.

В процессе проведения тренировки технические и программные средства СУТ должны давать возможность инструктору в полном объеме контролировать ход моделируемого процесса и действий операторов, осуществлять оценку результатов работы оператора (или экипажа) и

вводить необходимые управляющие воздействия. Контроль хода моделируемого процесса осуществляется преимущественно путем отображения на мониторах рабочего места инструктора информации о параметрах моделируемых процессов, об управляющих воздействиях операторов, о параметрах внешних объектов и визуальной информации, которую видят члены экипажа в средствах наблюдения в текущий момент. Кроме этого, в случае необходимости в РМО тренажера устанавливаются камеры телевизионного наблюдения за операторами. Для этого на них закрепляются средства съема информации ПФК (см. п. 7.4). Соответствующая информация отображается на средствах отображения информации рабочих мест инструкторов.

Управляя процессом тренировки, инструктор задает режимы и параметры моделируемых процессов, вводит (изменяет) начальные условия (НУ), а также вводит нештатные и аварийные ситуации (НАС) в процесс моделирования. Если управляемый объект должен взаимодействовать с другими объектами внешней среды, и поведение этих объектов не запрограммировано заранее (или они не управляются операторами, которые размещены в РМО других тренажеров, участвующих в тренировке), то инструктор при необходимости должен формировать управляющие воздействия, позволяющие имитировать их стандартное (или нестандартное) поведение. Средства СУТ должны содержать средства для решения этой задачи.

Кроме этого, СУТ должна обеспечивать возможность формирования и отображения на мониторах ПКУ результатов автоматизированной оценки операторской

деятельности, документирование всех основных параметров тренировочного процесса и периодически фиксировать информацию (контрольные точки), необходимую для последующего воспроизведения хода проведенной тренировки (см. п. 6.2).

После проведения тренировки, как правило, производится ее разбор инструкторами-методистами совместно с экипажем. При этом используются результаты документирования тренировочного процесса экипажа и автоматизированная оценка их операторской деятельности. Производится анализ допущенных ошибок; рассматриваются альтернативные варианты действий, которые могли бы привести к более успешным результатам.

В процессе рассмотрения хода выполнения того или иного этапа тренировки инструктор может иллюстрировать свои выводы отображением на мониторе отдельных фрагментов или всей проведенной тренировки в целом. Для этого средствами СУТ предусматривается механизм восстановления любой контрольной точки, зафиксированной во время тренировки, и при необходимости запуск процесса воспроизведения выполненной тренировки, начиная с данного момента. В п. 6.5 описан способ построения системы записи и воспроизведения тренировки, который позволяет не только представлять процесс уже выполненной тренировки, но и воспроизводить для тех же условий ситуацию с другими возможными вариантами управляющих воздействий и демонстрировать наилучшие в данной ситуации способы решения выполняемой задачи.

При проведении сложных и ответственных тренировок и в тех случаях, когда тренажер формируется на базе средств тренажерного комплекса, в состав бригады инструкторов целесообразно включать специалиста для инженерного сопровождения тренировки. Прерывание процесса тренировки по каким-либо причинам, не связанным с соображениями методиче-

ского характера, разрушает иллюзию работы оператора или экипажа в реальной среде, негативно отражается на его эмоциональном состоянии, расслабляет оператора (экипаж), приводит к неоправданным временным потерям и возможному нарушению расписания последующих тренировок. Поэтому при возникновении неисправностей и технических сбоев важно обеспечить диагностику и восстановление работоспособности средств тренажера в минимально короткое время.

Для выполнения этой задачи в составе СУТ необходимо предусматривать средства контроля, диагностики и восстановления функционирования системы. Наиболее оперативно эта задача решается путем резервирования (переподключения на исправные модули) при отказах средств тренажера. Проблема резервирования и восстановления работоспособности наиболее эффективно решается при использовании предложенной технологии построения тренажерных комплексов.

Так как в обеспечении одновременного функционирования нескольких тренажеров, входящих в состав тренажерного комплекса, используется большое количество взаимодействующих программных и аппаратных средств, то на этапе отработки и отладки комплекса нами эффективно использовалась центральная диспетчерская служба, средства которой позволяли отображать полную конфигурацию и состояние тренажерного комплекса и его составных частей, а также обеспечивать взаимодействие обслуживающего персонала в процессе поиска и устранения неисправностей с использованием средств служебной связи.

В целях постоянного улучшения работы тренажерного комплекса следует в обязательном порядке фиксировать все технические отказы и сбои в журналах его эксплуатации, производить анализ и фиксацию их причин, а также производить соответствующие мероприятия для ис-

12.1. Команды управления режимами работы СУТ

Наименование команды	Выполняемые действия
Отработка начальных условий	Текущее состояние математических моделей устанавливается в соответствии со значениями параметров, которые указаны в таблице начальных условий, введенных инструктором
Установка времени и масштаба времени	Дополнительным параметром этой команды является значение масштаба времени и признак смены суток. При поступлении команды указанный момент времени фиксируется как текущее (начальное) модельное время, начиная с которого производится моделирование всех процессов. Значение ускоренного, замедленного или нормального масштаба времени определяет шаг моделирования
Пуск тренировки	Осуществляется запуск всех моделей; обеспечивается обмен между программными модулями в соответствии со сформированной конфигурацией тренажера, а также производится вывод информации на имитационные системы и мониторы инструкторского контроля
Стоп	"Замораживание" тренировочного процесса. Запуск моделей на тактируемых интервалах прекращается, и ввод команд операторов блокируется. В этом режиме инструктор может скорректировать (или ввести новые) начальные условия и дать необходимые рекомендации экипажу. Для продолжения тренировки вновь вводится команда "Пуск тренировки"
Запись контрольной точки	Фиксация для последующего анализа среза всех параметров и модельного времени в момент поступления команды либо при достижении значения модельного времени, указанного в поле "время" соответствующего формата
Восстановление контрольной точки	В режиме "Стоп" производится поиск данных по указанному номеру контрольной точки; в соответствии с этими данными восстанавливается состояние моделей, записанное в контрольной точке, и модельное время. Воспроизведение соответствующего фрагмента производится по команде "Пуск тренировки"
Завершение тренировки	Процесс моделирования прекращается и производится сохранение результатов тренировки

ключения последующих отказов.

Решение всех указанных задач достигается программными и аппаратными средствами, входящими в СУТ. С этой целью для удобства организации проведе-

ния тренировок и обеспечения программной реализации их основных этапов вводится ряд основных режимов работы СУТ, которые устанавливаются командой инструктора (табл. 12.1).

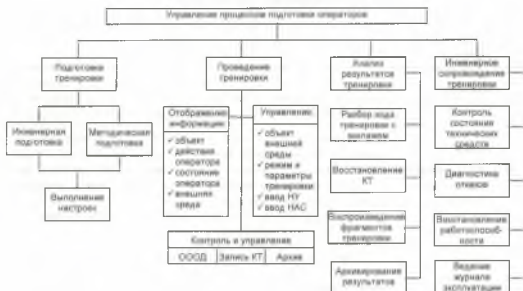


Рис. 12.1. Структура процесса профессиональной подготовки операторов на тренажерах

12.2. АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СУТ

Система управления тренировкой представляет собой автоматизированный комплекс аппаратных и программных средств, ориентированных на обеспечение тех задач контроля и управления процессом подготовки операторов, которые определены в п. 12.1.

Непосредственное управление тренировкой осуществляют инструкторы-методисты. Для работы инструкторов-методистов в составе тренажеров необходимо предусматривать специализированные рабочие места, сопрягаемые с комплексом моделирования. В простейшем случае (в простых специализированных тренажерах) в качестве рабочего места инструктора часто используют рабочую станцию, имеющую в своем составе средства отображения (монитор) и органы управления (клавиатуру, мышь, джойстики). Рабочая станция подключается к локальной вычислительной сети тренажера.

Однако в таком варианте рабочее место инструктора имеет весьма ограниченные возможности. Для осуществления инструкторского контроля и управления обучением, как правило, создаются специализированные пульты контроля и управления (ПКУ).

Структура типового комплекса технических средств СУТ приведена на рис. 12.2. Пульты контроля и управления являются центральными элементами этого комплекса.

Показанные на рис. 12.2 ПКУ могут использоваться как при проведении независимых тренировок экипажей на разных тренажерах, так и при проведении комплексной тренировки с одновременной работой нескольких тренажеров, экипажи которых взаимодействуют в рамках единой среды, моделируемой средствами тренажерного комплекса. В этом случае наряду с индивидуальными средствами отображения информации, устанавливаемыми на ПКУ, целесообразно использовать информационное табло коллективно-

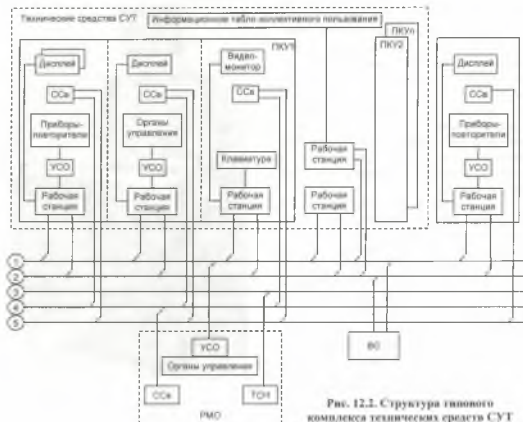


Рис. 12.1. Структура типового комплекса технических средств СУТ

го пользования, на которое выводится информация, необходимая всем членам инструкторских бригад (интегральная информация о состоянии моделируемых процессов, общая карта (или схема) совместных действий, справочная информация и др.)

В целях унификации целесообразно, чтобы ПКУ имели модульную структуру и унифицированный состав технических средств. Традиционно в составе ПКУ используются дисплеи графических станций и видеомониторы телевизионных средств наблюдения за экипажем, средства связи с экипажем, отдельные индикаторы (состояния оборудования, системного и модельного времени тренировки) и некоторые приборы-повторители штатного объекта. Применение приборов-повторителей

ранес широко практиковалось, потому что инструкторам удобно было оценивать ситуацию с помощью таких же средств, как и у экипажа. Например, инструкторы авиационных тренажеров – это, как правило, опытные летчики, которым привычная приборная среда позволяет адекватно воспринимать моделируемую на тренажере ситуацию.

Однако, во-первых, применение приборов-повторителей резко снижает уровень унификации модулей ПКУ; во-вторых, средства машинной графики позволяют при необходимости воспроизводить реальные приборы в таком же виде, как на штатном объекте.

Поэтому в современных тренажерах приборы-повторители практически не применяются, за исключением некоторых

штатных (или в тренажном исполнении) органов управления, позволяющих инструктору в случае необходимости взять управление на себя. Опыт применения полностью унифицированных пультов управления в космических тренажерах показал, что после создания эффективной, удобной системы отображаемых форматов и освоения технологии работы с ними, методические возможности и условия работы при проведении тренировок (по мнению самих инструкторов) существенно улучшаются.

В качестве примера на рис. 12.3 и 12.4 (см. цветную вкладку) приведены виды пультов, разработанных с участием авторов, которые применяются в составе специализированного тренажера сближения и стыковки и комплексного тренажера, входящего в комплекс тренажеров Российского сегмента МКС, в РГНИ-ИЦПК им. Ю.А. Гагарина.

Дисплеи графических станций являются основными средствами для отображения информации о ходе тренировок, моделируемой ситуации и действиях экипажа в процессе проведения тренировок. В состав рабочих станций ПКУ обычно включаются стандартные средства ввода информации (манипулятор типа "мышь", клавиатура, джойстики и т.д.).

Наряду с обычными мониторами в ПКУ могут использоваться дисплеи с сенсорными экранами, средства звукового ввода информации и многофункциональные индикаторы.

Мониторы используются также для дублирования видеоинформации о внешней визуальной обстановке, наблюдаемой операторами в РМО, и для визуального контроля состояния и действий операторов.

Аудиосвязь инструкторов с обучаемыми в процессе тренировки реализуется средствами имитации бортовой связи. Для этого на ПКУ устанавливается панель связи и микротелефонная гарнитура.

Сопряжение средств ПКУ с вычислительной системой (см. рис. 12.2) и дру-



Рис. 12.5. Унифицированная модульная секция ПКУ

гими системами тренажера обеспечивает-ся на основе общих сетей тренажерного комплекса (тренажера): локальных вычислительных сетей реального времени (1) и общего назначения (2), сетей телевизионной аппаратуры (3), системы имитации бортовой связи (4), ремонтно-технологической связи (5), сетей электропитания (6). Для сопряжения индикаторов, средств управления связи и органов управления, дублирующих органы управления, расположенных в РМО, используются стандартные устройства связи с объектом (УСО).

Конструктивно ПКУ целесообразно формировать из унифицированных модульных секций (рис. 12.5). В передней части секции устанавливается монитор, индикационные панели и органы управления. В задней части пульта предусмат-

ривается закрываемое дверцей рабочее пространство для установки компьютера, УСО, средств энергоснабжения. Сверху предусмотрено крепление для установки, при необходимости, еще одного монитора.

Верхний ряд мониторов рекомендуется использовать для отображения внешней визуальной обстановки и телевизионного контроля действий операторов. Использование секционных модулей (в том числе, угловых) позволяет компоновать пульта с различным количеством и составом рабочих мест в зависимости от типа тренажера и степени сложности решаемых на базе тренажера задач.

В составе ПКУ могут предусматриваться не только рабочие места инструкторов, но и рабочие места инженеров и врачей, контролирующих психофизиологическое состояние операторов. В ряде случаев в состав тренажера включается отдельный пульт врача.

Программные средства СУТ обеспечивают информационный интерфейс между пользователями ПКУ (инструкторами-методистами и инженерами) и средствами тренажера. Интерфейс строится на основе форматов, выводимых на дисплеи рабочих станций ПКУ. В состав программного обеспечения СУТ входят также программные модули ООД, психофизиологического контроля, записи и воспроизведения тренировок, документирования и архивации.

Совершенство форматов, используемых для организации проведения тренировок, целесообразно разделить на две группы: общесистемные форматы и специализированные форматы пользователей. Общесистемные форматы komponуются вместе с системной средой и обеспечивают предоставление общей информации о системах и средствах для выполнения типовых операций (использование средств службы времени и др.).

Форматы пользователя разрабатываются для конкретных прикладных задач (например, для представления информа-

ции по отдельным тренажерам, моделируемым системам и текущим значениям параметров этих систем). Системные средства должны обеспечивать периодическое обновление (например, один раз в секунду) информации на этих форматах.

Для операционной системы формат определяется как одно из множества окон, вызываемых инструктором в процессе работы.

С точки зрения инструктора формат – это логически связанная совокупность информационных полей, каждое из которых обеспечивает предъявление инструктору определенных сведений в соответствии с выполняемой задачей.

Специализированные форматы пользователей подразделяются на три основные группы:

- форматы начальных условий;
- форматы отображения;
- форматы команд.

Форматы НУ предназначены для ввода начального состояния моделей систем. Данные, введенные пользователем на этих форматах, передаются в модели по команде "отработать начальные условия". Форматы отображения предназначены для контроля параметров моделей систем. Форматы команд служат для ввода управляющих воздействий в модели систем, в частности, для задания аварийных и нештатных ситуаций.

На рис. 12.6 приведен в качестве примера формат начальных условий специализированного тренажера сближения и стыковки транспортного корабля.

Кроме указанных форматов в составе программных средств СУТ предусматривается создание главного окна системы (формата "Управление"), который необходим для управления всеми другими форматами тренажера и для ввода основных команд, связанных с организацией проведения тренировок.

Информационная связь между форматами и моделями систем реального времени управляемого объекта при ис-

Рис. 12.6. Формат начальных условий тренажера транспортного космического корабля "Дон-Союз-ТМ"

пользовании распределенной исполнительной оболочки ТРИО, описанной в п. 8.3, обеспечивается созданием в рамках математического обеспечения тренажера следующих баз данных:

- описание моделей систем и их размещение;
- описание общей области переменных;
- описание команд;
- описание форматов.

Кроме этого создаются базы данных, используемые для организации проведения тренировок:

- конфигурации (для подготовки файлов конфигурации тренажерного комплекса, используемых при загрузке);

– состояние ТС (информация о состоянии тренажерных средств – наличии и работоспособности средств тренажера);

– журнал тренировок (формирование расписаний, отметки начала и окончания режимов работы).

В "Журнале тренировок" устанавливаются ссылки на файлы регистратора событий, фиксирующие действия экипажа в ходе тренировки.

12.3. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТРЕНИРОВКИ НА БАЗЕ СРЕДСТВ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Комплекс работ, связанных с подготовкой, проведением тренировки и анали-

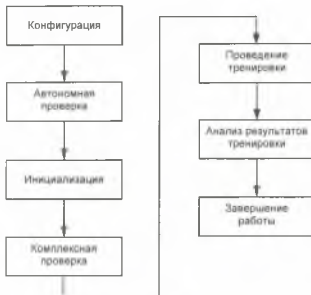


Рис. 12.7. Последовательность режимов подготовки и функционирования тренажера в составе тренажерного комплекса

зом ее результатов, можно представить в виде последовательности этапов (режимов), показанных на рис. 12.7. Эти этапы обеспечиваются программными средствами СУТ и системными средствами тренажера. Рассмотрим более детально содержание работ на каждом из этапов.

Конфигурация – это технологический режим, связанный с уточнением плана проведения тренировки, состава используемых средств и установлением связей между ними. При этом необходимо определить:

- состав технических средств, необходимых для проведения тренировки (РМО, моделирующие компьютеры, СИВО, РМИ);
- перечень упражнений и последовательность их выполнения;
- начальное состояние моделей, органов управления РМО, сюжетов в средствах наблюдения, средства контроля ТСН и прослушивания;
- задается циклограмма ввода команд управления и нештатных ситуаций,

привязанных к модельному времени;

- определяется контрольное время для выполнения отдельных упражнений;
- задается состав контролируемых в мониторе событий команд;
- формируется содержимое буфера временных команд.

В результате формируются файлы конфигурации для всех абонентов ВС, участвующих в тренировочной конфигурации. Файлы конфигурации хранятся в базах данных на сервере комплекса. При подготовке файлов имеется возможность использования шаблонов типовых конфигураций, которые уже имеются в базе данных "Конфигурация".

Автономная проверка – технологический режим, в процессе которого производится включение и автономная проверка технических средств в соответствии с выбранной конфигурацией средств для проведения тренировки.

Режим подготовки заканчивается подключением абонентов вычислительной системы к ЛВС общего назначения.

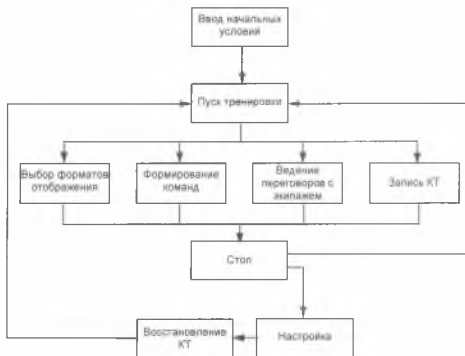


Рис. 12.8. Последовательность действий инструкторского персонала при проведении тренировки в режиме "Работа"

Инициализация – технологический режим, в котором по команде администратора тренажера с РМИ выполняются процедуры загрузки и сборки программно-аппаратных средств в соответствии с заданной конфигурацией тренажерных средств.

При этом по ЛВС общего назначения из баз данных, хранящихся на сервере комплекса, передаются файлы конфигурации и производится загрузка исполнительного программного обеспечения для заданной конфигурации, а также подключение абонентов к сети ЛВС реального времени. Администратором тренажера контролируется процесс инициализации и с этого времени ведется общесистемный контроль состояния технических средств, участвующих в тренировке.

Комплексная проверка – технологический режим комплексного тестирования

функциональной работоспособности конфигурации программных и технических средств, скомбинированных для выполнения тренировки.

Контроль осуществляется путем выполнения на тренажном канале специальных контрольных задач. С этой целью предусматривается выдача команд управления из РМО для проверки функционирования каналов. В результате проверки фиксируется готовность средств к тренировке в соответствии с тренировочным заданием.

После выполнения всех технологических режимов подготовки тренажер готов к проведению тренировки. Проведение тренировки осуществляется в режиме "Работа". Это основной режим функционирования тренажера, обеспечивающий моделирование условий работы экипажа и контроль правильности их действий.

ни. При этом запускается процедура, обеспечивающая доставку информации о выдаче этой команды к менеджеру моделей, и инициализируется процесс решения задач моделирования в реальном масштабе времени.

Команда "Стоп" останавливает счетчик модельного времени и также доставляется менеджеру моделей. Процесс решения задач моделирования приостанавливается.

В режиме "Стоп" инструктор имеет возможность вводить команды из основного меню.

Из режима "Стоп" возможен повторный пуск, либо переход в режим "Настройка". В режиме "Настройка" инструктор может ввести новые начальные условия, пользуясь форматом ввода НУ. При этом производится изменение значений переменных в базе данных общей области переменных, и модели осуществляют пересчет внутренних переменных с учетом введенных начальных условий.

Фаза "Запись контрольной точки" (КТ) предназначена для сохранения текущих значений информационных параметров тренировки, согласованных по времени. Задается с формата Управление выдачей соответствующей команды, либо периодически с заранее заданным периодом. Диспетчер моделей передает управление в точку входа "Запись/Восстановление КТ" с признаком "Запись". Модели выполняют формирование записей КТ в буфере КТ. После этого буфер КТ сбрасывается на жесткий диск.

Возобновление процесса моделирования можно начать с некоторого момента уже выполненного этапа тренировки. Для этого производится операция восстановления контрольной точки. В зоне параметров соответствующей команды указывается уникальный номер контрольной точки. Восстановление контрольной точки — фаза, обеспечивающая процедуру приведения выходных значений информационных параметров моделирования в

соответствии со значениями, соответствующими выбранной КТ из набора ранее записанных. Модель производит распаковку собственных параметров из буфера КТ и расчет всех своих выходных параметров.

Инструкторский персонал контролирует действия экипажа и состояние моделей бортовых систем с помощью форматов, высвечиваемых на ПКУ, информационном табло, кроме того, он ведет переговоры с использованием средств имитации бортовой связи с экипажем, использованием средств системы служебной связи — с инженерами и специалистами из числа обслуживающего персонала.

Осуществляя процесс управления тренировкой, инструктор использует оконные средства, предусмотренные следующими пунктами основного меню: "Команды", "Форматы", "Монитор событий", "Выход".

При выборе пунктов "Команды" или "Отображение", на экране появляется окно с соответствующим заголовком "Список форматов. Команды" или "Список форматов. Отображение", в которых указаны наименования всех форматов выбранного типа.

Формат "Команды" содержит два пункта: "Все команды" и "Буфер команд" (см. рис. 8.8), а подменю "Форматы" содержит перечень типов форматов.

Выбор пункта "Все команды" означает вызов на экран окна "Фильтр выбора команд", который является общесистемным форматом. Отсюда можно вводить все команды, для которых в базе данных не установлен флаг "Блокирован ввод".

Регистрация действий операторов при выдаче команд управления, а также изменение отдельных состояний моделей систем в ходе тренировки регистрируется в базе данных "Монитор событий" (рис. 12.10), который после завершения тренировки перезаписывается в архив, хранящийся на сервере комплекса. Доступ к "Монитору событий" возможен оператив-

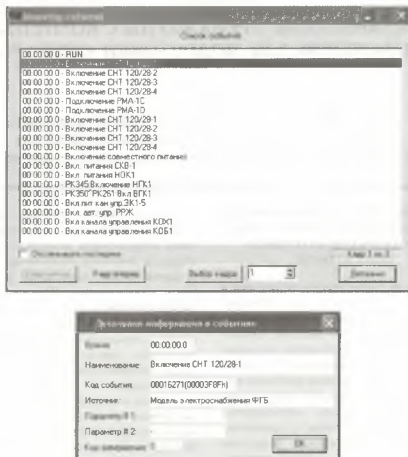


Рис. 12.10. Формат "Монитор событий" комплексного тренажера модуля "Звезда" МКС

но в процессе тренировки, а также после тренировки.

Тренировка заканчивается выдачей команды "Завершение работы", при которой выполняются процедуры завершения тренировки. При этом происходит закрытие файла формата "Монитор событий" и запись его в архив системы на сервере комплекса, а также делается запись в базу

"Журнал тренировки" об окончании тренировки. После этого освобождаются ресурсы моделирующих компьютеров для последующих работ (выполняется завершение задач на всех узлах вычислительной системы тренажера). При этом абоненты ВС отключаются от локальной вычислительной сети реального времени, но остаются в ЛВС общего назначения.

Раздел IV

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Глава 13

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ПРЕДТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

13.1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ В СИСТЕМАХ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Развитие вычислительной техники и современных информационных технологий приводит к появлению новых решений, связанных с построением средств профессиональной подготовки специалистов. Последние годы наряду с полномасштабными тренажерами все более широко для профессиональной практической подготовки операторов используются компьютерные комплексы с минимальным составом периферийного оборудования. Это обусловлено, с одной стороны, стремлением создавать максимально простые и дешевые тренажерные средства, с другой стороны, прогресс в области компьютерных средств обработки информации дает возможность исключать применение многих сложных технических устройств (например, оптико-механических имитаторов внешней визуальной обстановки и др.).

Функциональная структура компьютерного тренажера в целом практически не отличается от традиционной структуры, описанной в гл. 2. Однако некоторые имитационные системы в таком тренажере отсутствуют.

Основной отличительной особенностью компьютерных тренажеров является физическое отсутствие макета (или рабо-

чей зоны) объекта, которым управляет оператор. Необходимая для управления часть оборудования объекта воспроизводится на мониторе компьютера либо на большом экране сопрягаемой с компьютером видеосистемы. Для ввода управляющих воздействий обычно используются клавиатура или мышь. В отдельных случаях применяются рычаги управления, джойстики, педали, универсальные панели для отображения основного поля приборной среды.

Пульт контроля и управления в компьютерных тренажерах, как правило, не используется. Рабочим местом преподавателя-инструктора является либо отдельная рабочая станция, входящая в состав сети тренажера, либо отдельный монитор. В некоторых случаях инструктор размещается рядом с оператором и использует для контроля те же средства, что и обучаемый.

Система имитации внешней визуальной обстановки в компьютерных тренажерах реализуется обычно в ограниченном объеме (упрощенно). Средства имитации усилий и акселерационных ощущений, как правило, вообще не используются.

Таким образом, в целом уровень адекватности моделирования условий деятельности оператора в компьютерных тренажерах значительно ниже, чем при традиционном построении тренажеров. Поэтому, по мнению специалистов, компью-

терные тренажеры при подготовке операторов, управляющих сложными объектами, можно рекомендовать как дополнительные средства предварительной подготовки либо как средства поддержания навыков операторов (в частности, на борту реального объекта).

Перспективы более эффективного использования компьютерных тренажеров связывают с применением технологий виртуальной реальности. Виртуальная реальность – это имитация физической реальности компьютерными средствами. При этом виртуальная среда создается программными средствами компьютера и в ней формируются все объекты, которые может видеть и с которыми может взаимодействовать оператор (пользователь). Средства системы виртуальной реальности (СВР) как бы "погружают" оператора в виртуальную среду, дают ему возможность перемещаться в этой среде и взаимодействовать с ее объектами так же, как в реальном мире.

В простейшем случае у оператора действует в виртуальной среде только зрительный канал восприятия информации, и окном в виртуальный мир является обычный монитор. Более полное погружение в виртуальную среду осуществляется с помощью наглемного дисплея и перчаток данных. Средства СВР воздействуют на органы чувств человека таким образом, что он воспринимает среду как реально существующую, он может осуществлять в ней определенные действия (перемещаться, изменять положение объектов виртуальной среды, ощущать прикосновение к объектам виртуального мира и видеть реакцию на свои воздействия).

В такой системе поведение всех объектов виртуального мира моделируется программными средствами. Принципиальной особенностью применения такой системы является то, что в процессе моделирования некоторой среды сам оператор, активно воздействуя на ее объекты, становится участником воспроизводимой ситуации.

Системы виртуальной реальности уже находят широкое применение для моделирования сложных явлений и процессов в системах обучения, для оценки вида и свойств проектируемых изделий в САПР, при реализации виртуальных экскурсий, игр и т.д.

Применение компьютерных технологий виртуальной реальности в системах подготовки операторов и тренажерах можно рассматривать как очевидную и безусловно перспективную сферу практического использования СВР, так как назначение и сущность задач погружения обучаемого в моделируемую среду в тренажерных моделирующих комплексах и в системах виртуальной реальности по существу совпадают.

В тренажерах для воспроизведения условий деятельности операторов, управляющих объектом, и окружающей среды используется специальное макетное оборудование. В системе виртуальной реальности используется альтернативный способ погружения человека-оператора в условия среды с помощью компьютерных средств, специальных костюмов, имитирующих мышечные усилия, наглемных систем и перчаток данных, чтобы в процессе воздействия на органы чувств оператора формировать те же ощущения, которые должны иметь место в моделируемой ситуации. Поэтому с точки зрения функционального назначения и возможностей тренажеры можно считать "прародителями" современных систем виртуальной реальности.

В системах подготовки операторов технологии виртуальной реальности уже находят эффективное применение при отработке относительно несложных задач начального их обучения: изучения конструкции и бортового оборудования управляемого объекта, ознакомления с расположением, внешним видом панелей управления, принципами построения и процессами, которыми управляет оператор.

Преимущества применения технологий виртуальной реальности в системах практической подготовки операторов состоят в том, что, во-первых, исключается необходимость использования бортового оборудования – оно отображается на экране монитора или в настольной системе на основе компьютерного моделирования. При этом перераспределяются аппаратно- и программно реализуемые задачи имитационных систем, объем аппаратных средств существенно сокращается, основная нагрузка в формировании управляющих сигналов обеспечивается средствами вычислительного комплекса. Это, в свою очередь, приводит к сокращению стоимости моделирующего комплекса и сроков его создания.

Во-вторых, появляется возможность "погрузить" инструктора, обеспечиваемого аналогичными средствами СВР (шлем, перчатки), в ту же среду, в которой работает оператор. При этом исключается необходимость использования пульта инструктора.

Еще одно преимущество использования технологий виртуальной реальности – проведение на базе его средств теоретической подготовки операторов. Взаимодействие с объектами виртуальной среды может сопровождаться предъявлением обучаемому оператору справочных сведений о назначении, составе, принципе действия, технических характеристиках объектов и узлов, с которыми работает оператор.

Для лучшего понимания сущности изучаемых явлений оператора можно при необходимости "погружать" в изучаемые объекты и отображать происходящие в них физические процессы (например, перетоки жидкости, перераспределение полей температур, процессы передачи информации и т.д.). Можно давать оператору возможность "проникать" под обшивку или за панели пультов для изучения монтажа, иллюстрировать схемы прокладки кабелей, трубопроводов, причем отображение этих элементов можно производить "по слоям" для изучения отдельных авто-

номных систем, либо в комплексе в полном соответствии со штатным изделием. Данная возможность обычно отсутствует на физическом тренажере или реальном объекте.

Оператор может самостоятельно или под контролем преподавателя провести "виртуальную экскурсию", ознакомиться с оборудованием реального объекта, провести операции по ремонту или замене аварийных блоков, опробовать порядок и приемы выполнения операций, оценить последствия различных вариантов действий.

Таким образом, комплекс виртуальной реальности становится связующим звеном между теоретической и практической подготовкой, способствуя установлению ассоциативных связей между содержательным смыслом явления и его информационной моделью, воспроизводимой в виртуальной среде и на тренажере.

Возможности компьютерного комплекса можно расширять, включая в его состав средства автоматизированного обучения (активный, пассивный и ситуационный виды обучения) и придавая, таким образом, процессу обучения свойства адаптивности и индивидуальности. В этом случае на базе компьютерного комплекса создается многофункциональная система, в рамках которой можно реализовать различные режимы работы, например, режимы:

- "справочник" – для предъявления информационно-справочной информации;
- "обучение" – для изучения дисциплин путем последовательного предъявления текстово-графической информации с периодическим контролем усвоения материала;
- "контроль" – для углубленного контроля усвоения знаний и некоторых навыков с представлением возможности оперативного повторения неувоенного материала или упражнения;
- "экзамен" – для определения уровня обученности с целью определения рейтинга (оценки) качества знаний;

– "тьютор" – для демонстрации основных приемов операторской деятельности при изучении курса и при обучении работе с программой;

– "тренажер" – для реализации ситуационного обучения, заключающегося в формировании у обучаемого алгоритма анализа технического состояния бортовой системы и принятия решения по управлению ею.

На компьютерный комплекс могут возлагаться задачи обеспечения регистрации, накопления и хранения результатов обучения (в целях обобщения опыта проведения технической подготовки и внесения изменений в программу подготовки операторов), а также задачи планирования занятий с учетом начального уровня подготовленности, индивидуальных особенностей обучаемых и перерывов в их подготовке.

Чаще полное совмещение функций обучающей системы и тренажера не требуется.

13.2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Одной из основных проблем, которую необходимо решить в процессе создания компьютерного тренажера на базе технологий виртуальной реальности, является построение модели виртуального мира.

Модель виртуального мира должна содержать следующие основные компоненты.

1. Математические модели, описывающие сущность явлений и процессов, которые происходят в воспроизводимой среде. Требования к составу, полноте и адекватности этих моделей определяются тем, как должны проявляться законы функционирования объектов среды по отношению к пользователю с учетом тех действий, которые он потенциально может производить в данной среде.

2. Геометрические модели мира, обеспечивающие визуальное представление моделируемой среды либо на экране монитора, либо в нашемлем стереосистеме. Геометрическая модель виртуального мира формируется путем создания геометрических моделей всех объектов, помещаемых в этот мир.

3. Модели акустической обстановки, обеспечивающие имитацию звуковых эффектов, сопровождающих моделируемые события.

В зависимости от важности восприятия других факторов моделируемой среды при наличии соответствующих технических средств СВР в состав комплекса могут включаться дополнительно модели имитации акселерационных, тактильных ощущений и мышечных усилий.

Все указанные модели взаимосвязаны и воспроизводятся синхронно во времени. Рассогласование моделей не только разрушает иллюзию присутствия в виртуальном мире, но может вносить дискомфорт и даже психические расстройства.

Математическая модель виртуального мира представляет собой совокупность моделей поведения всех объектов виртуальной среды. Это, прежде всего, модель поведения объекта, которым управляет оператор, и модели тех объектов, которые он видит и с которыми взаимодействует управляемый объект.

Модели динамики движения управляемых объектов и бортовых систем создаются так же, как в тренажерах с учетом объема отрабатываемых на базе комплекса задач. Если такие модели уже были разработаны для тренажера (с учетом использования принципов модульного построения, изложенных в гл. 3), то они могут быть заимствованы, как готовые компоненты. Дополнительно должны быть разработаны программные средства перемещения оператора в виртуальной среде и модели, определяющие реакцию отдельных объектов среды на воздействия оператора.

Геометрическая модель виртуального мира, как отмечалось, формируется на

основе построения геометрических моделей всех объектов, которые помещаются в этот мир. Модель каждого объекта содержит набор данных, определяющих геометрические параметры объекта (форму, размеры, координаты точек), атрибуты (цвет, характер поверхности, текстуру), светотехнические характеристики (количество и расположение источников света, их интенсивность), параметры состояния (для объектов, изменяющихся в процессе моделирования), а также структурную информацию о взаимосвязи объектов.

Для описания объектов применяются различные методы. В зависимости от характера решаемых задач объект может быть описан как сплошное тело, как видимая поверхность объекта, задаваемая функциями первого и второго порядка, либо как проволочная сетка (каркас объекта).

Исходное описание производится обычно в собственной системе координат объекта. Для описания движения объектов и наблюдателя в виртуальной среде и формирования отображаемой картины в выходных устройствах используются и другие системы координат: глобальная система координат сцены, в рамках которой формируется виртуальный мир, и система координат экрана. Последовательность преобразований, которым подвергается модель в процессе формирования и вывода изображения, образует видовой конвейер, который включает в себя следующие процедуры:

- конструирование сцены на основе геометрических преобразований элементов изображения;
- перспективное преобразование элементов 3-мерной сцены на картинную плоскость экрана;
- отсечение геометрических элементов по видимому объему;
- удаление невидимых линий и поверхностей;
- расчет светотехнических характеристик видимых поверхностей;
- преобразование в растровую форму;
- закрашка поверхностей;
- отображение сформированной моде-

ли в средствах наблюдения.

Сцена представляет собой видимую пользователем часть моделируемого пространства. Конструирование производится путем размещения в наблюдаемой сцене каждого видимого объекта, заданного в собственной системе координат. Система координат объекта помещается в систему координат сцены на основе выполнения аффинных преобразований типа "перенос", "поворот", "масштабирование". Преобразования осуществляются для каждой точки объекта умножением матрицы ее однородных координат на матрицу соответствующего аффинного преобразования (вращения, растяжения, сжатия, переноса, отражения).

Представляя матрицы преобразований в унифицированном виде (4×4) , можно перемножить матрицы в порядке выполнения преобразований и получить результирующую матрицу перемещения $[R]$; тогда задача конструирования сцены сводится к расчету координат всех точек объекта в системе координат сцены умножением матрицы координат исходных точек, заданных в базе данных, на матрицу перемещения $[R]$:

$$[X' Y' Z' 1] = [X Y Z 1] \times [R].$$

Перспективное преобразование обесценивает проецирование 3-мерной сцены на плоскость изображения (картинную плоскость экрана). Для каждого канала стереосистемы центр проецирования совпадает с положением соответствующего глаза наблюдателя, а начало системы координат наблюдателя выбирается на линии визирования – оси Z , вдоль которой направлен взгляд наблюдателя. Оси X , Y образуют плоскость наблюдения. Проекцию любой точки сцены на эту плоскость можно получить умножением матрицы этой точки в однородных координатах сцены на матрицу перспективного преобразования:

$$[X' Y' Z' 1] = [X Y Z W] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

где k – расстояние от центра проекции до картинной плоскости, на которую осуществляется проектирование сцены.

Связанное с проектированием отсечение элементов по видимому объему заключается в удалении всех элементов геометрической модели, которые не попадают в пирамиду видимости, образованную плоскостями, проходящими через центр проектирования и границы прямоугольника, определяемого размерами экрана. Принадлежность точки объекта к отображаемому на экране пространству определяется на основе оценки положения этой точки в пространстве относительно плоскостей пирамиды видимости, либо ее координат после проектирования по отношению к границам окна (внутри либо вне экрана).

Одной из наиболее трудоемких задач видового конвейера является удаление невидимых линий и поверхностей – задних поверхностей объемного тела и поверхностей, перекрываемых другими, ближе расположенными объектами. Для решения этой задачи разработчиками систем машинной графики используются различные методы (алгоритмы Роберта, Варнока, алгоритмы построения сканирования, трассировки лучей и др.).

Наиболее часто для удаления невидимых поверхностей используют алгоритм, основанный на использовании Z-буфера. Сущность этого алгоритма состоит в организации дополнительного блока памяти – буфера глубины (Z-буфера), емкость которого принимается равной числу адресуемых позиций на экране. Каждому пикселу на экране соответствует ячейка Z-буфера. При сортировке граней, которая может осуществляться в произвольном порядке, рассчитывается координата Z точки поверхности объекта, которую пересекает проектирующий луч, и если это значение меньше, чем зафиксированное при предыдущих расчетах, оно заносится в Z-буфер как расстояние до ближайшей грани; при этом атрибуты соответствующей

поверхности (интенсивность, цвет) фиксируются в соответствующей пикселу ячейке видеобуфера.

Расчет светотехнических характеристик изображения производится с учетом яркости, расположения и формы источников света, ориентации и свойств видимых поверхностей, а также положения наблюдателя относительно наблюдаемых объектов. В ряде случаев при построении модели освещения ограничиваются расчетом светового потока, отраженного от поверхности, причем интенсивность этого потока представляется как сумма трех составляющих: зеркального отражения, диффузного отражения света и отраженного рассеянного света.

Расчеты производятся с использованием точных либо упрощенных выражений, определяемых законами геометрической оптики. Более точные модели основаны, в частности, на использовании алгоритмов обратной трассировки лучей. Более высокая корректность этих алгоритмов определяется учетом света, отраженного от других объектов сцены и света, проходящего через полупрозрачные тела.

При формировании реалистичных изображений весьма важным является также использование стандартных либо разрабатываемых пользователем моделей, обеспечивающих формирование теней от объектов и различного рода спецэффектов (туман, дымка, пламя и т.д.).

В качестве выходных устройств отображения информации в системах синтеза изображений используются, как правило, телевизионные мониторы либо жидкокристаллические решетки. Информация, отображаемая на таких экранах, представляется как дискретная матрица точек – пикселов. Для привязки изображения к целочисленным координатам экрана используются специальные алгоритмы преобразования в растровую форму. Для исключения негативного восприятия факторов, обусловленных дискретностью процесса

разложения в растр и представлением модели объекта в виде граней, используются специальные процедуры сглаживания и алгоритмы закраски (закраска методом Гуро, закраска Фонга), обеспечивающие плавное изменение интенсивности от пиксела к пикселу.

При формировании реалистичных изображений наряду с закраской поверхности обычно решается задача нанесения текстуры. Текстура определяет вид и строение поверхности (заранее подготовленный рисунок, узор) и задается в фактурном пространстве. При наложении текстуры производится отображение фактурного пространства на пространство изображения. Как правило, используется линейная функция отображения, параметры которой рассчитываются из условия совпадения опорных точек фактурного пространства и пространства объекта. Рассчитанные значения цвета каждого пиксела экрана заносятся в видеобuffer и затем отображаются на экране.

В качестве показателей для оценки динамических характеристик канала формирования изображения используется число обрабатываемых полигонов или число выводимых пикселей в единицу времени. Однако наиболее существенной с точки зрения восприятия формируемой картины пользователем является частота формирования кадров. Для того, чтобы движение объектов воспринималось как непрерывное, необходимо, чтобы производительность системы обеспечивала формирование не менее 20 кадров в секунду.

Следует отметить, что, так же, как и в тренажерах, необходимость обеспечения режима реального времени является одним из самых важных требований к построению моделей виртуальной среды. Поэтому шаг интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих динамику протекания процессов и поведения объектов, присутствующих в виртуальном мире, должен выбираться таким образом, чтобы с одной стороны, обеспе-

чивать требуемую точность вычисления параметров, а с другой стороны, при принятии изменения моделируемой ситуации оператор по возможности не должен замечать дискретности выполнения расчетов. С этой точки зрения шаг интегрирования не рекомендуется выбирать больше, чем $0,05 \dots 0,1$ с. В то же время, учитывая сложность моделируемых процессов и ограниченные возможности вычислительных средств, разработчик может принимать решение о допустимости незначительных рывков.

Динамические характеристики канала формирования изображения становятся критичными при большой размерности геометрической модели: при большом количестве объектов сцены, увеличении числа каналов (например, при формировании стереозффекта), количества полигонов, объема текстур.

Еще одним фактором, определяющим динамические характеристики канала формирования изображения, являются временные затраты на обмен между оперативной памятью и видеопамятью видеоадаптера или графического ускорителя. Эта составляющая зависит от объема видеопамяти, размера геометрической модели и количества текстур. Для сложных реалистичных изображений с большим количеством текстур при недостаточном объеме видеопамяти становятся критичными временные параметры шины передачи данных. Для уменьшения времени формирования кадров целесообразно либо увеличивать объем видеопамяти, либо использовать высокоскоростные каналы передачи данных.

Очевидно, чем выше качество системы (адекватность моделирования и возможности), тем больше, как правило, затраты, необходимые для ее построения. Технические решения, принимаемые в процессе создания СВР, связаны обычно с достижением рационального компромисса, определяемого преимущественно требованиями пользователя.

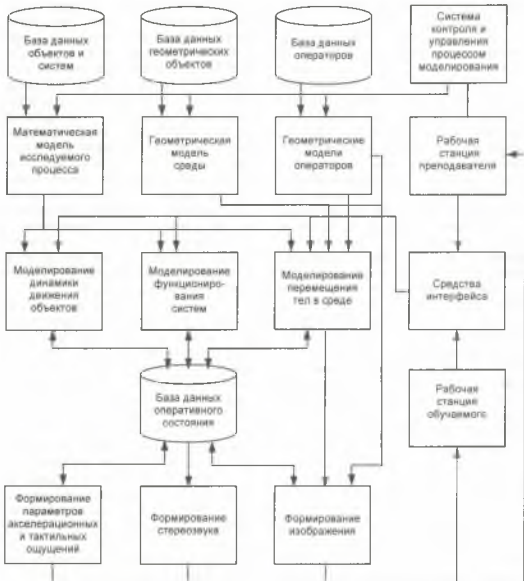


Рис. 13.1. Функциональная схема типового компьютерного комплекса виртуальной реальности

Так же, как в тренажере, средствами компьютерного комплекса должно обеспечиваться формирование двух основных контуров:

- а) моделирование условий деятельности оператора;
- б) контроль и управление процессом обучения со стороны инструктора.

В системе виртуальной реальности моделирование деятельности оператора производится путем создания виртуальной среды. В свою очередь, модель виртуальной среды должна содержать геометрические модели объектов, в окружении которых находится оператор, управляя реальным объектом. Система контроля и

управления тренировкой строится так же, как в тренажере (см. гл. 12).

Функциональная схема типового компьютерного комплекса представлена на рис. 13.1.

Необходимая для моделирования виртуальной среды информация хранится в базах данных системы. База данных процессов и систем содержит математические модели явлений и процессов, которые протекают в виртуальной среде. Эти модели позволяют рассчитывать параметры, определяющие положение и состояние всех объектов виртуального мира.

База данных геометрических объектов содержит данные с описанием геометрических параметров (формы, размеров), характера и свойств поверхностей всех потенциально видимых объектов, источников света и др. Эта информация используется для построения трехмерного изображения виртуальной среды.

База данных операторов необходима в том случае, если в виртуальной среде работает несколько операторов, которые могут видеть друг друга. Геометрическая модель оператора позволяет строить изображение оператора в среде с учетом положения, задаваемого с его рабочей станции. При этом состояние динамических объектов (панелей, люков, индикаторов) интерьера должно быть идентичным для всех пользователей. Инструктор должен иметь возможность наблюдать произвольную зону объекта, контролировать работу одного или нескольких операторов и всю ситуацию в целом. Если в моделируемой среде присутствуют дополнительно лица, которые непосредственно не работают в системе, то база данных операторов должна содержать не только геометрические модели этих лиц, но и модели их действий в этой среде.

Перед началом моделирования преподаватель (при самостоятельной работе сам пользователь) должен задать исходные данные, которые определяют устанавливаемые режимы, параметры систем

и начальное состояние моделей, после чего осуществляется пуск. В результате реализации моделей рассчитываются значения параметров движущихся тел, внутренние и выходные параметры функционирующих систем и производимых процессов, а также координаты тел, перемещаемых оператором. Рассчитанные значения параметров характеризуют текущее состояние моделируемых процессов и заносятся в базу данных оперативного состояния. На их основе осуществляется построение трехмерного изображения и формируется звуковое сопровождение на рабочих станциях обучаемого и преподавателя, а при наличии соответствующих внешних устройств имитируются другие факторы, воздействующие на оператора в моделируемой среде.

На рабочей станции преподавателя данные о моделируемой ситуации могут представляться в аналогичной форме, однако с учетом применяемой методики и задач обучения ему необходимо представлять дополнительную информацию о параметрах протекающих процессов и результатах действий обучаемых.

Средства интерфейса (мышь, оконное меню, перчатка данных) позволяют как обучаемому, так и преподавателю участвовать в моделируемом процессе, целенаправленно изменяя виртуальную среду (переключать органы управления на виртуальных панелях, открывать двери, переносить предметы и др.).

Система контроля и управления дает возможность преподавателю перезапускать процессы, изменять режимы, вводить нештатные и аварийные ситуации. Эта система должна включать также средства для регистрации результатов моделирования и расчета обобщенных показателей качества работ, выполненных обучаемыми.

Результаты моделирования динамики движения объектов, их бортовых систем и внешней среды используются для формирования в каналах выходных устройств комбинированных изображений, которые

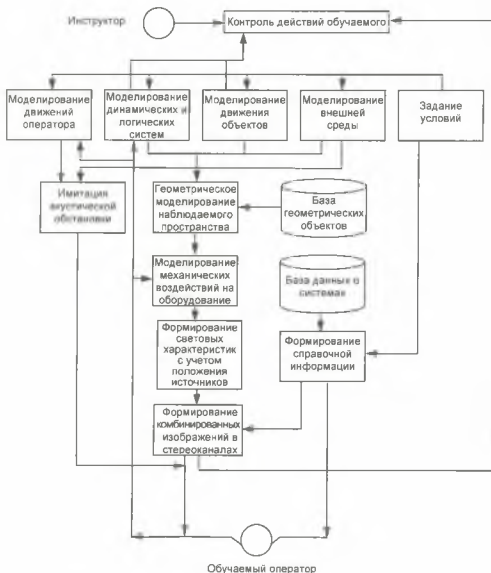


Рис. 13.2. Функциональная схема комплекса подготовки операторов с использованием СВР

воспроизводят моделируемую среду и с учетом положения оператора и результатов его взаимодействия с объектами предъявляются обучаемому, а также инструктору, осуществляющему обучение.

С учетом дополнительных задач, указанных в п. 13.1, в состав компьютерного комплекса необходимо включить

также информационно-справочную систему и средства учебно-методического сопровождения (планирования процесса подготовки, оценки уровня подготовки и др.).

Справочная информация, которая хранится в базе данных о системах, отображается по запросу оператора или ин-

структура. Эта информация содержит сведения о порядке работы экипажа, назначении, составе, правилах эксплуатации и ремонта, технических характеристиках той аппаратуры, на которую указывает обучаемый в виртуальной среде. Функциональная схема комплекса подготовки операторов с использованием СВР приведена на рис. 13.2.

Для формирования виртуальной среды на этапе подготовки СВР к работе в базе данных системы создается адекватное математическое описание виртуальной среды на основе построения геометрических моделей всех виртуальных объектов. Объектами виртуального мира могут быть:

- статические объекты, расположенные в моделируемом пространстве и имеющие постоянные свойства, без реакции на взаимодействие с другими объектами и оператором в процессе моделирования;
- динамические объекты, расположенные в моделируемом пространстве и имеющие разные свойства. В процессе моделирования динамические объекты могут изменять свое состояние при взаимодействии с другими объектами или при воздействии оператора на них при помощи стандартных аппаратно-программных средств ввода управляющих воздействий.

Для построения геометрических моделей используется, как правило, метод полигонального описания как универсальный и наиболее экономичный способ описания поверхностей. Построение геометрических моделей объектов осуществляется стандартными программно-аппаратными средствами трехмерной графики.

После создания виртуального мира определяется начальное положение и ориентация оператора в виртуальном мире. Оператор снабжается набором сервисных средств, позволяющих ему передвигаться, изменять направление движения, воздействовать на окружающие его объекты, изменять собственные характеристики перемещения и состав объектов виртуальной среды.

Для моделирования реакции объектов виртуальной среды на действия оператора и внешние воздействия реализуются алгоритмы перемещения и поворота отдельных объектов виртуального мира, изменения состава и интенсивности источников света, изменения цвета объекта и др. Идентификация объекта, по отношению к которому производится какое-либо действие, происходит с помощью мыши, перчатки данных, либо внешней команды от моделей бортовых систем.

В зависимости от типа идентифицированного объекта и его текущего состояния отрабатывается алгоритм действий, соответствующий реакции данного типа объекта на воздействие. В частности, при открывании (закрывании) дверей и люков в каждом цикле формирования изображения производится приращение угла поворота открывающейся двери (вместе с расположенными на ней объектами) на заданную величину.

В процессе моделирования оператор может перемещаться в виртуальном пространстве, взаимодействовать с объектами виртуального мира в режиме реального времени.

Если в моделируемой ситуации участвует несколько операторов, то каждый из них обеспечивается своей рабочей станцией аналогичной конфигурации. Все рабочие станции объединяются в сеть для обеспечения их взаимодействия. Для моделирования среды в этом случае целесообразно выделить отдельный сервер.

13.3. СТРУКТУРА КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРЕДТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Рассмотрим прежде всего структуру комплекса технических средств титановой системы виртуальной реальности (рис. 13.3). Ядром системы является вычислительный комплекс, который обеспечивает математическое моделирование виртуальной среды и функционирование всех объ-

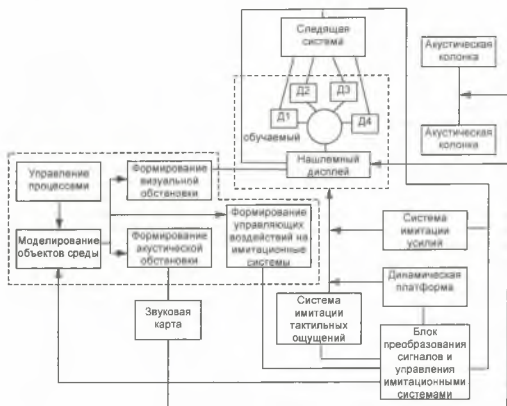


Рис. 13.3. Структура технических средств СВР

ектов этой среды. На основании расчета параметров объектов средствами вычислительного комплекса формируется визуальная картина мира, акустическая обстановка, а также управляющие сигналы для имитации других факторов виртуального мира.

Основным внешним устройством в системе полного погружения является нашлемная дисплейная система, которая крепится на голове оператора и позволяет отображать ему стереоизображение моделируемой среды. Стереозффект достигается на основе использования бинокулярного и двигательного параллакса за счет формирования двух различных изображений для правого и левого глаза. Оба изображения выводятся на два миниатюрных экрана шлема с использованием жидкок-

ристаллических индикаторов либо оптоволоконных шайб, которые сопрягаются с телевизионными мониторами. Комбинированное изображение, формируемое в сознании человека, создает у пользователя впечатление наблюдения трехмерной картины.

В шлем-дисплей, как правило, монтируются наушники для создания полного аудиовизуального окружения. В наушниках синтезируются или воспроизводятся записанные ранее текстовые сообщения и звуковые эффекты, сопровождающие те события, которые происходят в виртуальном мире.

При отсутствии нашлемной дисплейной системы изображение среды может выводиться через видеoadaptor на обычный монитор, а акустическая обста-

новка – воспроизводиться акустическими колонками стереосистемы.

Следующим по важности элементом системы являются перчатки данных (чаще используется одна перчатка, одеваемая на правую руку). Перчатка данных – устройство ввода информации от кисти руки, отслеживающее положение как отдельных пальцев, так и кисти в целом, а также обеспечивающее восприятие человеком тактильных ощущений в процессе "взаимодействия" с объектами. В виртуальном мире дублируется положение реальной руки, что дает возможность с помощью перчатки выполнять две основные функции: указывать направление перемещения пользователя в виртуальном мире и указывать объекты, с которыми взаимодействует пользователь (чтобы, например, взять объект, перенести его и др.). Кроме перчатки в СБР могут использоваться другие средства ввода информации (манипулятор, джойстик, клавиатура, мышь и т.д.).

Для имитации тактильных ощущений в перчатках размещаются специальные надувные мешки, которые осуществляют давление на определенные участки кисти и пальцев.

Существуют более сложные конструкции перчаток данных, в которых предусматривается регулирование силовой нагрузки для имитации усилий.

Для фиксации положения головы и частей тела в пространстве используется система датчиков (D1, D2 ...), которые закрепляются на соответствующих участках тела. Сигналы с датчиков поступают в следящие системы, которые осуществляют их обработку и ввод в вычислительный комплекс для определения координат тела в пространстве и отображения местонахождения пользователя в виртуальном мире.

Если в моделируемой ситуации существенны большие перемещения (например, при имитации бега, спортивных упражнений), то можно использовать специальные костюмы с установленными в

них датчиками слежения за движением тела, а также системами имитации силовой нагрузки для имитации мышечных усилий.

Для имитации акселерационных ощущений, связанных с изменением положения тела в пространстве, используют специальные динамические платформы.

Реализация всех указанных возможностей требует применения достаточно мощного вычислительного комплекса. Для большинства приложений при построении вычислительного комплекса можно рекомендовать персональные компьютеры на основе современных мощных процессоров фирм Intel или AMD с оперативной памятью свыше 1 Гбайт. Для обеспечения достаточной скорости формирования изображения сложных сцен в составе компьютера станции можно использовать двухпроцессорные вычислители, графические ускорители с большим объемом видеопамати, большим количеством конвейеров и современных шин передачи информации (AGP, PCI-Express).

В настоящее время наиболее часто используются видеоплаты с чипами двух фирм NVIDIA и ATI, которые являются законодателями технических решений в области машинной графики. Используя достижения этих фирм, производятся очень эффективные графические акселераторы, например, на сегодняшний день: акселератор трехмерной графики PowerPack! Ultra/2400 тайваньской компании Gainward построен на микросхеме GeForce 6800, оснащен восемью модулями памяти Samsung (2-не GDDR-3), частота шины памяти составляет 1 ГГц, суммарный объем видеоОЗУ составляет 256 Мбайт. Данный графический процессор по своей архитектуре имеет 16 пиксельных и 6 вершинных конвейеров, позволяет выполнять шейдеры версии 3.0 и совместим с DirectX 9.0c.

Приведем примеры некоторых других технических средств, которые используются для оснащения СБР.

Для того, чтобы моделировать акустическую обстановку, используются звуковые платы, работающие с инструментальными программами создания виртуальных миров. В частности, предлагаемая фирмой Creative звуковая плата Audigy 2 ZS Platinum построена на базе звукового чипа Creative CA0102-ICT, поддерживает формат 7.1 акустической системы и технологии синтеза трехмерного звука A3D/EAX. Обеспечивает звуковое оформление виртуальной реальности с помощью пользовательского интерфейса языка Си.

Для усиления эффекта погружения оператора в виртуальный мир в состав комплекса виртуальной реальности, как отмечалось выше, включается нашлемная система (шлем виртуальной реальности HMD).

Высоким качеством изображения благодаря хорошему цветовому контрасту и наиболее функциональным дизайном отличается шлем V8 Фирмы Virtual Research Systems. Он позволяет формировать стереоизображение виртуального мира, а также управлять камерой наблюдателя с помощью датчика позиции и ориентации головы.

Широкое применение находит также шлем виртуальной реальности Virtual Technologies V8, который имеет следующие характеристики: частота визуализации 60 Гц; разрешение 640×480 и 800×600 ; True Color 16 млн цветов; стереозвук Hi-Fi (левый и правый канал). Отображение информации осуществляется с помощью жидкокристаллических матриц, а для фиксации позиции и ориентации головы используется датчик Fastrak Polhemus. Система контроля позиции и ориентации датчиков (система Polhemus) включает в себя излучатель, создающий электромагнитное поле, датчики (до 4 шт.), которые измеряют положение и ориентацию в контрольных точках, и контроллер, который передает данные в ЭВМ, снимает значения с датчиков, преобразует их в цифровую форму и управляет излучателем.

Кроме нашлемных систем в СВР используются различные типы очков. В очках "3D Max" фирмы Kasan Electronics используется чересстрочная развертка на растре 1280×768 пикселей. Во время развертки четного полукадра открыт левый затвор и на четных строках растра формируется изображение для левого глаза; во время нечетного полукадра – открыт правый затвор и на нечетных строках растра видно изображение для правого глаза.

В очках CrystalEyes PC, CrystalEyes и CrystalEyes VR фирмы StereoGraphics Corp. изображение формируется на экране монитора персонального компьютера, а пользователь видит при этом трехмерное стереоскопическое изображение сквозь линзы CrystalEyes. Аппаратные и программные средства расщепляют сигнал монитора на два сигнала частотой 60 Гц, которые синхронизируются с жидкокристаллическими затворами, закрывающими поочередно то один, то другой глаз, в то время когда монитор дает изображение для другого глаза.

Для создания эффекта присутствия и интерактивного взаимодействия оператора с объектами виртуального мира в режиме реального времени достаточно широкое применение находят перчатки данных CyberGlove и Cyberglove Virtual Hand.

Дорогостоящая перчатка CyberGlove фирмы Virtual Technologies является современным высококачественным изделием для полностью реактивной среды погружения. В этой эластичной перчатке расположены 18 датчиков, предназначенные для точного отслеживания почти любого движения руки. Программные средства изделия содержат трехмерную модель руки, которой может быть дополнена любая из используемых прикладных программ виртуальной реальности. На перчатке предусмотрены места для установки датчиков фирмы Polhemus.

Перчатка данных Cyberglove Virtual Hand имеет 18 сенсоров для снятия углов

поворота соединений фаланг пальцев и имеет обратную связь для создания тактильных ощущений. Эта перчатка данных комплектуется датчиком Polhemus Fastrak для фиксации положения и ориентации кисти в виртуальном мире. Контроллер перчатки данных производит обмен с ЭВМ с частотой 115200 Гц. Перчатка данных комплектуется также программными средствами, обеспечивающими отображение положения руки оператора в виртуальной среде. Стандартная геометрическая модель руки состоит из 2600 полигонов. Для обеспечения взаимодействия оператора с виртуальной средой была разработана система кодирования жестов, а также программные средства их распознавания и формирования признаков формируемых оператором команд.

Примерами других характерных устройств взаимодействия с виртуальной реальностью являются джойстики, манипуляторы и следящие системы.

Джойстик (манипулятор) Flight Control System фирмы ThrustMaster имитирует штурвал управления реактивного истребителя. Как и большинство джойстиков, он подключается к игровому порту и не требует программы-драйвера. У него имеется несколько кнопок и четырехпозиционный переключатель, который позволяет осматривать место действия. В зависимости от программных средств джойстик Flight Control System может эмулировать шесть степеней свободы различными способами.

Манипулятор CyberWand фирмы InWorld VR с дополнительным датчиком фирмы Polhemus фактически представляет собой рукоятку системы Flight Control System без подставки. Четыре кнопки этого виртуального контроллера и расположенный сверху двухкоординатный датчик задают движение с шестью степенями свободы.

Устройство Spaceball 2003 фирмы SpaceTec IMC Corp. представляет собой подставку с установленным в углублении

шаром, удобно охватываемым рукой. Управлять движением можно, толкая шар в одном из направлений, одновременно нажимая соответствующую кнопку на подставке. Это устройство работает со всеми основными инструментальными пакетами, предназначенными для построения миров виртуальной реальности.

Устройство NetMouse Pro фирмы EMouse представляет собой по существу трехклавишную мышь. Для имитации двух степеней свободы мышь может перемещаться по коврику влево-вправо и вперед-назад. Для дополнения остальных 4-х степеней свободы используются клавиши. Пользователь, управляя перемещением, может держать одну руку на клавиатуре, а другую – на манипуляторе "мышь".

В следящих устройствах для определения положения и ориентации пользователя в реальном мире и отображения их в моделируемой виртуальной среде используются различные способы обнаружения движения (ртутные балансиры, радиоволновые, ультразвуковые, лазерные методы). Одна из популярных разработок в этой области – устройство FaSTRAK фирмы Polhemus, в котором используется электромагнитная следящая система с шестью степенями свободы. Система содержит маленький, легкий датчик, который крепится на голове (или на шлемо-дисплее). Дополнительные датчики можно поместить на руках, груди или талии. Датчики принимают сигналы, излучаемые маленьким передатчиком, и транслируют их на базовое устройство, подключенное к COM-порту. Задержка обновления в устройстве FaSTRAK составляет 4 мс и пользователь ее практически не замечает. Работа с этой системой предусмотрена в большинстве инструментальных пакетов виртуальной реальности.

В связи со сложностью и высокой стоимостью описанных выше технических средств в практике использования технологий виртуальной реальности чаще

всего ограничиваются формированием только зрительных и акустических образов виртуальной среды.

Предтренажную подготовку целесообразно проводить сразу с группой обучаемых операторов. Поэтому в составе комплекса необходимо предусматривать одну рабочую станцию преподавателя (инструктора) и несколько (по числу обучаемых) рабочих станций обучаемых. На каждой рабочей станции обучаемого целесообразно устанавливать однотипные технические средства для ввода управляющих воздействий (рычаги, педали, манипуляторы, перчатки данных и др.). Вместо указанных средств можно использовать мнемонические изображения органов управления на экране монитора, однако при выполнении динамических операций снижение адекватности реакции оператора может быть весьма ощутимым, и такое решение следует принимать с учетом конкретных задач, возлагаемых на создаваемый комплекс.

Все основные функциональные задачи комплекса, отмеченные в п. 13.2, реализуются программными средствами вычислительной сети комплекса. Так же, как в тренажере, программными средствами компьютерного комплекса должно обеспечиваться формирование двух основных контуров: моделирование условий деятельности оператора; контроль и управление процессом обучения со стороны инструктора.

Система управления тренировкой (СУТ) должна включать в себя модули, обеспечивающие запуск процессов, изменение режимов, ввод нештатных и аварийных ситуаций, а также модули регистрации результатов моделирования и расчета показателей качества работ, выполненных обучаемыми.

В качестве системных средств организации вычислительного процесса в сети и оперативного обмена информацией между программными компонентами целесообразно использовать разработанную

для тренажерных комплексов тренажерно-ориентированную оболочку (см. гл. 8).

На каждой рабочей станции обучаемого имеются средства геометрического моделирования виртуальной среды, программные средства интерфейса пользователя и средства обработки вводимой и выводимой информации. На рабочей станции инструктора размещается комплекс математического моделирования объекта, внешней среды и программные средства системы управления тренировкой. Воздействия оператора на органы управления в виртуальной среде фиксируются и передаются в систему моделирования бортовых систем, а результаты моделирования, в соответствии с логикой функционирования бортовых систем, передаются в комплекс СВР. С использованием средств геометрического моделирования рабочей зоны с учетом действий по изменению положения отдельных элементов, а также положения обучаемого формируется обстановка, соответствующая моделируемой ситуации.

Если объем моделируемых систем объекта достаточно большой, то для обеспечения задач моделирования динамики движения объектов, их бортовых систем и внешней среды, а также задач информационно-справочной системы в составе системы целесообразно выделить отдельные серверы.

13.4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Для проектирования компьютерного комплекса на основе применения средств виртуальной реальности разработчику необходимо освоить технологию формирования реалистичных изображений виртуального мира. Это связано, прежде всего, с методикой построения качественных геометрических моделей виртуальной

среды и грамотным применением инструментальных программных средств СВР.

Формирование картины виртуального мира включает в себя следующие этапы.

1. Определение состава объектов виртуальной среды, их характеристик и требований к отображению среды.
2. Анализ иерархии и взаимосвязей геометрических объектов, определение уровней необходимой детализации объектов виртуального мира.
3. Построение статических (неподвижных) 3D-объектов мира.
4. Построение динамических геометрических элементов.
5. Формирование фоновых перспективных изображений (например, ландшафта), а также специальных визуальных эффектов.
6. Подготовка и ретуширование текстур, составление библиотек материалов.
7. Раскраска и текстурирование 3D-объектов.
8. Формирование сценариев событий (анимация), привязка и синхронизация звукового сопровождения.
9. Вывод изображения в процессе моделирования.

Для формирования и вывода изображений в СВР следует эффективно использовать широкий арсенал существующих программных и аппаратных средств машинной графики. Среди этих средств можно выделить программные пакеты для создания геометрических моделей, средства редактирования изображений и специальные графические библиотеки для вывода на средства отображения динамически меняющихся картин в реальном масштабе времени.

Используемые в настоящее время системы моделирования виртуальной реальности можно разделить на три группы:

– средства высокого уровня, которые позволяют прикладному программисту создать моделируемый мир, использовать заранее подготовленные геометрические мо-

дели объектов, позиционировать объекты, источники освещения, камеру наблюдателя в виртуальном пространстве, изменять свойства объектов моделируемого пространства; создание виртуального мира и управляющей программы системы моделирования с использованием пакетов виртуальной реальности высокого уровня является менее трудоемким и может быть выполнено в короткие сроки;

– библиотеки среднего уровня, в которых обычно отсутствуют сервисные функции управления объектами виртуального мира и не используются стандартные форматы файлов геометрических моделей и текстур;

– средства низкого уровня, предоставляющие программисту только возможность непосредственного доступа к аппаратным средствам – регистрам палитры, видеопамати, функциям графических ускорителей; в этом случае программирование функций формирования и преобразования среды осуществляет пользователь самостоятельно с учетом специфики системы.

Наибольшее распространение получили следующие инструментальные средства.

1. Программа Open Inventor накапливает информацию виртуального мира в объектно-ориентированной базе данных, называемой графом сцены (scene graph). Это удачная структура, которая хранит информацию, предназначенную для создания живого, интерактивного трехмерного мира. Здесь содержатся трехмерные объекты и их атрибуты, информация об освещенности, программные видеокамеры и процессоры, которые обеспечивают эффекты движения и выполняют необходимые вычисления, манипуляторы, события, формы и действия. Созданный для этой базы данных специальный формат файлов позволяет пересылать интерактивные трехмерные миры по локальной сети или по сети Internet и устанавливать их на компьютеры других моделей. После формирования структуры базы данных графа

сцены создаются приложения – программы на языке Си++ для наполнения базы данных графа сцены. Программа загружает базу данных в память, и виртуальный мир оживает.

2. Программа WorldToolKit (фирмы Sense8) является системой высокого уровня моделирования виртуального пространства. Она содержит библиотеку функций на языке Си. Вызываемые функции оживляют мир, импортируют, масштабируют или перемещают объект, задают его поведение, подключают датчики для восприятия входных команд и движений оператора. Функции библиотеки позволяют обнаруживать столкновения (например, при попытках пройти сквозь стену) и устанавливать связи между несколькими мирами, чтобы пользователь мог перемещаться из одного мира в другой.

Программные средства WorldToolKit (WTK) работают на многих платформах, от DOS и Windows всех вариантов до Unix на машинах фирм Digital, HP, IBM, SGI (Silicon Graphics Inc.) и Sun. Фирма Sense8 предусмотрела работу почти со всеми интерфейсными устройствами виртуальной реальности, включая шлемы-дисплеи, следящие устройства, устройства ввода с шестью степенями свободы, контроллеры объемного звука и всегда важные графические акселераторы. Поэтому программа WorldToolKit в полной мере отвечает задачам инструментальной среды CBR.

3. Графическая библиотека DirectX является одной из наиболее распространенных и поддерживается практически всеми типами графических ускорителей. DirectX имеет компоненты и высокого, и низкого уровня.

В отличие от пакета WTK, в котором объекты являются равноправными элементами сцены, связанными в общий линейный список, библиотека DirectX реализует в режиме высокого уровня иерархическую структуру сцены, в которой объекты собраны в группы (фреймы). Программист имеет возможность задавать

перемещение в сцене как фрейма в целом, так и отдельных его элементов.

4. Библиотека программ трехмерного моделирования OpenGL создавалась для профессиональных графических станций, однако последние годы она широко используется на платформе PC. OpenGL имеет весьма широкий набор функций и обеспечивает превосходное качество изображений, а также высокую точность построения картины виртуального мира. По своим возможностям, точности и реалистичности изображений эту библиотеку можно отнести к числу самых лучших.

Кроме указанных инструментальных пакетов существует несколько библиотек низкого уровня, созданных разработчиками различных ускорителей.

В практике построения виртуальных миров используются практически все указанные библиотеки. Выбор того или иного пакета для конкретного приложения, как правило, зависит от возможности его приобретения (стоимости), объема геометрической модели, требований к качеству изображения и к временным характеристикам системы.

Для достижения максимальной эффективности разрабатываемого моделирующего комплекса при его проектировании обычно исходят из необходимости наиболее полного удовлетворения требований к проектируемому изделию при минимальных затратах. Практически последнее требование связано с ограничением на вычислительную мощность используемого компьютера. Обычно перед разработчиком системы визуализации виртуальной среды стоит задача обеспечить в заданной системе достаточно высокие динамические характеристики и хорошее качество (реалистичность) изображения, причем, чем сложнее геометрическая модель, тем труднее одновременно удовлетворить этим требованиям в связи с большим объемом вычислений.

Требования к высоким динамическим характеристикам обусловлены необ-

ходимостью формирования изображения в реальном масштабе времени. Как правило, для оценки динамических характеристик используются два основных показателя: максимальная пропускная способность (число обрабатываемых полигонов в секунду) и максимальная производительность закраски (число пикселей в секунду). Для пользователя уменьшение производительности проявляется в уменьшении частоты формируемых кадров (fps).

При уменьшении частоты формирования следующих друг за другом кадров менее 20-ти, начинает ощущаться дискретность смены картины. В свою очередь, частота формирования кадров зависит от объема памяти и производительности компьютера, от сложности геометрической модели и использованных средств для получения качественного изображения. Основные вычислительные затраты компьютера связаны с реализацией операций видового конвейера, включая геометрические преобразования, светотехнические расчеты и дисплейные процедуры.

Оценка временных характеристик описанных выше инструментальных средств показывает, что с этой точки зрения в лучшую сторону отличается пакет DirectX. В частности, в результате экспериментальных тестов было установлено, что частота кадров для одной и той же сцены при использовании пакета DirectX была втрое выше, чем при использовании пакета OpenGL.

Качество формирования виртуального мира в значительной степени зависит от способов и инструментальных средств построения геометрических моделей объектов. Существует большое количество 3D-редакторов, обладающих различными функциональными возможностями для создания трехмерных сцен. К таким инструментальным средствам относятся: 3DStudioMax, Maya, SoftImage, 3DFX Asymetrix, AutoCAD и т.д. Формат представления 3D-сцен у этих программных

продуктов самый различный (.3DS, .MAX, .DXF, .NFF, .SCN, .X).

Высокое качество и реалистичность изображения достигается на основе применения текстур, однако их использование существенно повышает вычислительные затраты, связанные с построением изображений. Технология формирования текстур включает в себя сканирование и оцифровку кино- и фотоматериалов, коррекцию, ретуширование, масштабирование оцифрованных изображений объекта, а также конвертацию в требуемый формат представления (.GIF, .JPG, .BMP и т.д.).

Для получения качественных текстур сканирование фотонизображений должно быть выполнено с максимально возможной разрешающей способностью (не менее 150 точек на дюйм); при необходимости выполняется фокусировка, регулирование яркости и контрастности изображения, а также коррекция оцифрованного изображения с целью устранения перспективных и ракурсных искажений. При ретушировании изображения удаляются лишние и случайные элементы, осуществляется цветовая и тональная коррекция.

При масштабировании изображения размеры текстур необходимо выбирать таким образом, чтобы удовлетворялись ограничения инструментальных средств визуализации и используемых графических библиотек. В частности, для использования текстур в среде DirectX рекомендуется графический формат представления BMP; размер текстуры по горизонтали и вертикали желательно выбирать одинаковым. Так как объем видеопамати ограничен, то необходимо принимать меры, чтобы общий объем всех изображений виртуальной сцены не превышал объема текстурной памяти видеокарты. В противном случае программное обеспечение используемого вывера должно динамически подгружать и удалять соответствующие текстуры, что будет снижать скорость формирования изображения.

Следует отметить, что в современных графических ускорителях применяется ряд методов, которые позволяют достигать высокого качества и реалистичности изображения: интерполяция, выбор уровня текстуры, билинейная, трилинейная, анизотропная фильтрация, мульти-текстурирование, многопроходное построение изображения, полноэкранное и краевое сглаживание и др.

Для ряда задач при построении виртуального мира необходима реализация различных спецэффектов (имитация огня, взрывов, тумана, деформирования среды и др.). Так, например, при создании модели карбюраторного двигателя необходимо воспроизводить сжатие газа, взрыв смеси, задымление. При моделировании захвата грунта ковшом экскаватора необходимо имитировать деформацию среды под ковшом и сыпание части грунта. При моделировании таких видеоэффектов, как взрывы, огонь, туман используется механизм *particle systems* (система частиц), в основе которого лежит генерация большого количества мелких объектов (частиц), обладающих заданными свойствами (масса, цвет, упругость, прозрачность, продолжительность жизни). Эти частицы взаимодействуют между собой на основе физических законов механики, гравитации, магнетизма и др.

Каждый создаваемый эффект является по-своему уникальным. Например, для получения компьютерного дождя используются частицы, представляющие собой небольшие объекты каплевидной формы. Эти частицы порождает объект заданных размеров, например, облако. Под действием имитируемых сил гравитации частицы устремляются к земле. При необходимости им можно задать свойство упругости, и тогда они как капли дождя будут отскакивать от поверхности. При этом каждая частица может разделяться на несколько более мелких. Для имитации ветра нужно изменять направление вектора движения капель по отношению к земле. Аналогично можно моделировать водопад или фонтан.

В настоящее время достаточно хорошо отработана технология моделирования и других эффектов: размывание, увеличение резкости, тиснение, акварельный эффект.

Следует иметь в виду, что применение спецэффектов, повышение детальности картины и других способов улучшения качества, как правило, приводит к увеличению вычислительных затрат. Поэтому даже при правильном выборе и использовании графических библиотек желательно искать нестандартные подходы к решению задачи существенного повышения частоты кадров визуализации виртуального мира.

Для того чтобы по возможности уменьшить время формирования кадров, можно рекомендовать:

- а) повышение производительности за счет использования сопроцессоров, графических ускорителей, современных видеокарт с большим объемом видеопамати, высокоскоростных шин передачи данных (AGP) и др.;
- б) возможное упрощение геометрических моделей; минимизация числа полигонов при сохранении качества за счет рационального применения текстур;
- в) использование геометрических моделей с несколькими уровнями детализации;
- г) использование при возможности вместо трехмерных (3D) изображений плоских (2D) картин, в частности, для удаленных от наблюдателя объектов;
- д) уменьшение объема обрабатываемых в реальном времени объектов за счет разделения пространства на части и обеспечения динамической загрузки/выгрузки моделей по мере перемещения оператора.

Для повышения эффективности формирования и модернизации трехмерных сцен в интерактивном режиме некоторые разработчики создают свои дополнительные инструментальные средства – автоматизированные конструкторы виртуальных миров, которые позволяют работать с ба-

зами данных объектов, загружать их из внешнего файла, дополнять существующую базу данных новыми объектами, а также формировать новые базы данных. В рамках такого конструктора создаются программы, которые дают возможность формировать различные сцены из ранее созданных объектов, удалять и создавать новые объекты, произвольно изменять расположение (позицию, ориентацию) объектов, их характеристики и параметры движения (ось вращения, направление перемещения и т.д.) и отображать необходимую справочную информацию об объектах сцены.

Интерфейс системы включает в себя одно или несколько видовых окон, строку состояния, в которой выдается информация о текущем действии, пиктограммы и многоуровневое меню, располагаемое над видовыми окнами и пиктограммами.

Отображение загруженных объектов виртуального мира осуществляется при помощи камеры. Для работы с камерой в конструкторе предусматривается набор команд по ее установке, перемещению и повороту. Параметры положения и ориентации камеры могут быть изменены по желанию пользователя.

Работа с использованием конструктора начинается с вызова файла, описывающего геометрическую модель размещаемого объекта. Информация об этом объекте хранится в базе данных объектов. Далее с учетом используемого инструментального пакета производится конвертация файла в нужный формат. Загруженный файл располагается в начале координат виртуального мира.

После выделения объекта кнопкой мыши происходит активизация окна с информацией о положении объекта, углах поворота относительно осей координат, имени файла, из которого загружается его геометрическая модель, уникальное имя объекта в виртуальном мире и прочая информация.

Для перемещения объектов в заданном направлении создается специальная панель управления со стрелками. Позиционирование объекта и поворот его по координатным осям на заданный угол можно производить также изменением значений в соответствующих полях информационного окна. Если объект не выделяется, то действия панели управления распространяются на все объекты сцены, что визуальное отображается как перемещение камеры в соответствующее положение.

Для ускорения расчета каждого кадра сцены все объекты могут отображаться в виде каркасных моделей.

Разработка конструктора должна производиться с учетом возможности его использования с различными инструментальными средствами. При этом следует учитывать, что в разных пакетах (например, в пакете WTK и пакете DirectX) применяется различный механизм обеспечения ориентации объектов в пространстве.

Использование описанных выше инструментальных средств позволяет достаточно эффективно решать задачи формирования виртуального мира, моделировать поведение всех его объектов и отображать построенную схему на экране (или в нашемной системе) с учетом положения наблюдателя.

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРЕДТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

14.1. ПОРЯДОК СОЗДАНИЯ, МОДЕРНИЗАЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Первый опыт применения технологий виртуальной реальности в сфере подготовки космонавтов был связан с созданием в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина интерьера ОК "Мир" на основе программного пакета SuperScape. Уже первые результаты выявили две основные проблемы: необходимость принятия специальных мер для достижения высокого качества изображения и для улучшения временных характеристик моделирующего комплекса. Время формирования кадра для сложных сюжетов составляло несколько секунд, что практически исключало работу в реальном масштабе времени. Возникла необходимость отработки эффективной технологии формирования баз данных и выбора относительно недорогих, но производительных вычислительных средств.

Указанные проблемы были учтены при создании комплекса виртуальной реальности для предтренажерной подготовки экипажей космонавтов к полетам на МКС.

Этот комплекс обеспечивает решение следующих задач подготовки экипажей космонавтов:

- изучение конструкции и оборудования, а также компоновки орбитальных модулей МКС как отдельно, так и в связке;
- выработка у космонавтов первоначальных навыков по выполнению режимов управления бортовыми системами, включая контроль работоспособности, консервацию и расконсервацию систем модулей МКС;

- ознакомление с методами и способами проведения ремонтно-восстановительных и погрузочно-разгрузочных работ на МКС;

- отработка циклограмм по выполнению типовых рабочих суток, в том числе при подготовке к комплексным и зачетным тренировкам;

- отработка космонавтами совместно с преподавателем бортовой документации;

- совместный с преподавателем, а также самостоятельный анализ действий экипажа космонавтов после проведения занятий на тренажерах; совместный с преподавателем послеполетный анализ действий экипажа;

- сдача зачетов и экзаменов;

- поддержание и закрепление знаний и навыков по деятельности на борту орбитального комплекса.

Кроме этого, компьютерный комплекс виртуальной реальности является эффективным средством отработки учебно-методических задач в процессе подготовки преподавателей (инструкторов). К числу таких задач относятся:

- разработка методик проведения занятий в классе, на тренажерах, а также теоретических занятий;

- подготовка упражнений и циклограмм проведения тренировок на комплексе тренажеров;

- анализ выполнения экипажем (обучаемым) тренировочных задач и упражнений, как в классе, так и на тренажерах;

- разработка и подготовка учебно-справочного материала различного назначения.

Компьютерный комплекс виртуальной реальности используется в двух режимах:

- автономное изучение состава модулей МКС, внешней компоновки каждого модуля, внутреннего их устройства, размещения аппаратуры бортовых систем и средств управления;

- изучение экипажем космонавтов работы бортовых систем МКС с использованием их математических моделей. Второй режим, таким образом, предусматривает отработку практических навыков управления МКС.

В связи с жесткими требованиями к производительности комплекса первая его версия была ориентирована на использование профессиональной графической станции Silicon Graphics Indigo 2 Impact с операционной системой IRIX6.2. Одновременно создавалась аналогичная система для платформы IBM PC – на базе персонального компьютера с графическим ускорителем с операционной системой Windows NT. При моделировании виртуального мира использовался инструментальный пакет прикладных программ создания приложений виртуальной реальности WorldToolKit фирмы Sense 8.

В основу проектирования компьютерного комплекса виртуальной реальности положены те же принципы модульности и унификации основных компонентов, которые успешно зарекомендовали себя при создании тренажерных комплексов, специализированных и комплексных тренажеров. Это позволяет расширять состав задач (объектов виртуальной среды) и функциональных возможностей комплекса, апробировать в процессе эксплуатации новые технические средства и перспективные решения.

Последовательно была создана виртуальная среда, содержащая виртуальный интерьер Функционально-грузового блока (модуля "Заря") Российского сегмента Международной космической станции; выполнено сопряжение объектов вирту-

альной среды с моделями бортовых систем МКС; аналогичная работа была выполнена для Служебного модуля (модуль "Звезда") Российского сегмента Международной космической станции. Затем виртуальные интерьеры обоих модулей были объединены, что позволило инструкторам проводить занятия с экипажами космонавтов по изучению одновременно двух модулей Российского сегмента МКС как единого целого.

При решении задачи моделирования совместной работы модулей МКС их геометрические модели привязываются к единой глобальной системе координат. Это дает возможность воспроизводить на базе комплекса переход из одного модуля в другой, операции стыковки транспортного корабля с МКС и выхода космонавтов и астронавтов в открытый космос.

Экспериментальные занятия по бортовым системам Служебного модуля и Функционально-грузового блока Российского сегмента МКС в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина начали проводиться в 1998 году.

Разработанный авторами монографии компьютерный комплекс виртуальной реальности позволяет проводить занятия по изучению космонавтами и астронавтами бортового оборудования, его расположения в интерьере, логики работы пультного оборудования и бортовых систем (систем энергоснабжения, ориентации солнечных батарей, обеспечения теплового режима, системы стыковки и внутреннего перехода). В процессе моделирования космонавт имеет возможность взаимодействовать с объектами виртуального интерьера и работать с панелями управления бортового оборудования.

Что очень важно, компьютерный комплекс виртуальной реальности обеспечивает одновременную предтренажную подготовку нескольких космонавтов и астронавтов. При этом появилась возможность получения навыков их совместной работы на одном пилотируемом космическом аппарате.

В состав компьютерного комплекса входит информационно-справочная система, которая дает возможность космонавту в процессе проведения занятий получать дополнительную информацию о бортовых системах МКС, порядке выполнения операций, технических характеристиках оборудования и др.

В целях более эффективного проведения индивидуальной подготовки (самоподготовки) космонавтов создан "облегченный" вариант компьютерного комплекса, в котором программные средства адаптированы к компьютеру типа Laptop, используемого на борту МКС. Для увеличения эффекта присутствия космонавта в моделируемом пространстве в состав комплекса были включены шлем виртуальной реальности Virtual Research V8 и перчатка данных Cyber Glove Virtual Hand. Однако их использование в штатном режиме было ограничено из-за опасений негативного влияния этих средств на психофизиологическое состояние человека при длительной работе в виртуальной среде.

Для разбора ошибок, анализа и оценки результатов проведенных занятий по аналогии с тренажерами, в состав компьютерного комплекса для предтрениажной подготовки входит система записи и воспроизведения тренировки. Инструктор имеет возможность полностью контролировать процесс тренировки и во время занятий создавать проблемные ситуации для обучаемого космонавта, прививая навыки их решения.

При проектировании компьютерного комплекса виртуальной реальности была заложена возможность расширения как базы данных виртуальных объектов, так и комплекса в целом. В частности, в состав модели МКС, кроме модулей Российского сегмента "Заря" и "Звезда", были включены модули американского сегмента AST. Кроме того, этот комплекс был дополнен за счет включения в его состав моделей оборудования, размещаемого за лицевыми

панелями, что дало возможность космонавтам открывать двери панелей и взаимодействовать с объектами запанельного оборудования, а также получать дополнительную справочную информацию о работе этого оборудования.

Создание и успешная эксплуатация компьютерного комплекса виртуальной реальности для предтрениажной подготовки экипажей космонавтов в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина позволили включить в регламент подготовки космонавтов к работе на МКС принципиально новый, не имевший аналогов в мире, тренировочный комплекс на базе технологий виртуальной реальности, отличающийся расширенными методическими возможностями.

14.2. СТРУКТУРА КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРЕДТРЕИАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В основу построения компьютерного комплекса виртуальной реальности для предтрениажной подготовки экипажей космонавтов и астронавтов к работе на МКС положены технические решения, изложенные в п. 13.3.

На первом этапе аппаратно-программный комплекс виртуальной реальности создавался на базе двух рабочих станций. Впоследствии комплекс (рис. 14.1) расширился за счет включения в его состав:

- трех рабочих места обучаемых;
- рабочей станции инструктора;
- сервера моделирования бортовых систем;
- сервера информационно-справочной системы;
- эмулятора бортового переносного компьютера типа Laptop.

Рабочая станция № 1 виртуальной реальности предоставляет обучаемым возможность работы с погружением в виртуальную среду с помощью наשלем-



Рис. 14.1. Структура тренажерного комплекса на базе технологий виртуальной реальности

ного стереодисплея, перчатки данных и системы контроля положения оператора в виртуальном пространстве. Она была реализована на двухпроцессорной станции с процессорами типа Xeon 450 МГц, имеющими кэш 2 Мб, ОЗУ объемом 256 Мб, видеоакселератор типа Elsa Gloria XXL с 16 Мб видеопамяти и жесткий диск объемом 9,1 Гб.

Рабочая станция № 2 виртуальной реальности предназначена в основном для самостоятельной работы обучаемого (или преподавателя). Она реализована на базе ПЭВМ, в состав которой входит процессор Pentium II, 400 МГц, имеющий кэш 512 кб, ОЗУ объемом 192 Мб, видеоакселератор типа Matrox Millenium-2 с 8 Мб видеопамяти и жесткий диск объемом 2 Гб. Рабочие станции оснащены мониторами 21". Математическое обеспечение включает операционную систему WIN NT V4.0, пакет 3D-графики WORLD TOOL KIT V 9 для создания трехмерных сцен.

Рабочая станция №3 виртуальной реальности оснащена рабочей станцией INDIGO, IMPACT фирмы Silicon Graphics и имеет монитор 20" с разрешением 1024 × 1024. Базовое программное обеспечение – операционная система IRIX 6.2. В качестве инструментального средства разработки 3D графики и анимации использован пакет WORLD TOOL KIT V 6.0. Разработанный на его основе прикладной пакет позволяет перемещаться в интерьере орбитальных модулей и взаимодействовать с объектами (открытие/закрытие дверей, нажатие/отжатие кнопок, переключение тумблеров и т.д.). При этом с помощью системных средств обеспечивается взаимодействие с сервером системы моделирования. Таким образом, на мониторе РМО1 отображается не только картина, соответствующая текущему положению наблюдателя, но и в соответствии с логикой работы бортовых систем производится отображение текущего состояния сигнализации на пультах и блоках.

Рабочая станция инструктора обеспечивает решение задач контроля и управления проведением занятий с обучаемыми и оснащена следующими средствами: ПЭВМ типа IBM PC, P II 266 МГц, RAM 64 МБ, монитор 17" с разрешением 1024×1024. Математическое обеспечение включает операционную систему WIN NT V 4.0 и пакет SAMMI RUN-Time для обеспечения графического интерфейса преподавателя с системой моделирования объектов.

Программные средства рабочей станции инструктора позволяют в процессе проведения занятия осуществлять ввод и обработку начальных условий, пуск процесса моделирования, останов, изменение масштаба времени, ввод нештатных ситуаций и другие действия, соответствующие функциям типовой системы управления тренировкой. В этих целях указанные средства унифицированы с программным обеспечением пультов контроля и управления комплекса тренажеров РС МКС в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина. На мониторе рабочей станции преподавателю представляется информация о действиях обучаемого, параметрах моделируемых процессов и состоянии бортового оборудования.

Сервер моделирования бортовых систем МКС реализует логику их работы и оснащен ПЭВМ, в состав которого входит процессор Pentium II, 400 МГц, имеющий кэш 512 кб, ОЗУ объемом 64 Мб, видеоакселератор типа Matrox Millenium-2 с 8 Мб видеопамяти и жесткий диск объемом 2 Гб.

Математическое обеспечение включает операционную систему Windows MS и специальное математическое обеспечение, реализованное на базе распределенной тренижной оболочки ТРИО. Математические модели бортовых систем, входящих в состав модулей МКС, реализуются строго в соответствии с документацией на реальные бортовые системы для обеспечения адекватности моделируемых процессов.

Модели систем в моделирующем сервере могут работать в любой конфигурации в реальном или ускоренном масштабе времени. В целях унификации в сервере моделирования используются те же математические модели, которые разработаны для комплекса тренажеров РС МКС.

Сервер информационно-справочной системы предназначен для оперативного представления обучаемому космонавту информации о назначении, составе, принципах построения и функционировании бортовых систем и блоков модулей МКС. Сервер представляет собой ПЭВМ типа IBM PC, P II – 400 МГц и ОЗУ 64 Мб и содержит базу данных информационно-справочной системы (ИСС) в виде файлов формата HTML. Информационно-справочная система выполнена в виде графических объектов и текста, формируемых в объеме, который достаточен для полного раскрытия изучаемого материала. Обучаемый, таким образом, имеет возможность получать в наглядном виде информацию об интересующем его объекте. Сервер информационно-справочной системы выполнен в виде веб-сервера. Представление информации пользователю осуществляется с помощью стандартных Интернет-браузеров. Поиск информации происходит как в виде стандартных запросов, так и с помощью "горячих ссылок".

Использование INDIGO 2 IMPACT в качестве рабочей станции для обучаемого производилось в целях эксперимента. Следует отметить, что принципиальных различий в качестве представляемого мира на INDIGO и IBM PC, при использовании мониторов с разрешением 1024 × 1024, не наблюдалось. Характеристики комплекса на базе Pentium II практически не уступали характеристикам комплекса на базе Indigo-2 и давали возможность работать в реальном масштабе времени. Поэтому при последующем расширении задач комплекса вычислительная сеть формировалась на базе компьютеров, оснащенных графическими ускорителями.

В последующем по мере развития технических средств для повышения методических, эргономических и технических характеристик данного комплекса осуществляется постоянная модернизация технических и программных средств на современном уровне.

Эмулятор Laptop обеспечивал имитацию взаимодействия с бортовой вычислительной системой МКС.

Компьютерный комплекс разрабатывался с учетом взаимодействия с Имитатором американского сегмента (AST) МКС.

Программное обеспечение комплекса включает в себя средства моделирования динамики перемещения объекта (орбитальной станции), моделирования работы служебных бортовых систем, состояние которых отображается на пультах управления, "перемещения" космонавта в виртуальной среде, а также моделирования реакции объектов этой среды на действия оператора.

Использование на первом этапе в качестве инструментальных средств пакета WORLD TOOL KIT позволило обеспечить независимость от применяемой платформы.

В качестве базовой библиотеки использовалась также библиотека OpenGL, версии которой существуют на WIN NT и на IRIX 6.2, что позволило реализовать виртуальный интерьер орбитального модуля ФГБ Российского сегмента МКС для платформ Silicon Graphics и PC. С использованием этой версии достигнуто высокое качество изображения, однако существенного улучшения динамических характеристик достичь не удалось.

Для улучшения технических характеристик компьютерного комплекса была проведена разработка альтернативного варианта системы имитации визуальной обстановки с использованием пакетов создания приложений с трехмерной графикой DirectX, позволившая получить удовлетворительные результаты для моделирования визуальной картины на платформе персонального компьютера PC

под операционной системой Windows 98/2000. Приложения, созданные на базе пакета DirectX, отличаются хорошей динамикой, высокой производительностью на базе относительно недорогих персональных компьютеров платформы PC. Эта версия была принята за основу при реализации комплекса на базе Laptop, а затем и на других рабочих станциях.

Принятые технические решения позволяют обучаемому космонавту "перемещаться" внутри модулей ФГБ и СМ Международной космической станции и в открытом космическом пространстве вблизи них, а также производить управление бортовым оборудованием.

В компьютерном комплексе реализованы следующие формы взаимодействия оператора с виртуальным миром:

- "Сборка" виртуального мира, наполнение мира на этапе подготовки к погружению определенным набором объектов.

- "Перестроение" мира в произвольный момент времени, исключение части объектов (например, перегородки, запального оборудования определенных систем и др.), дополнение мира новыми объектами, формирование каркасного представления объектов.

- "Свободное перемещение" оператора в пределах заданного пространства с различными скоростями, обозрение виртуального мира во всех направлениях с возможностью изменения угла поля зрения, запрет или разрешение перемещений, осуществление которых недопустимо с точки зрения реального мира (например, проход сквозь стену и др.).

- "Взаимодействие" оператора с объектами виртуального мира: возможность перемещения объектов, находящихся на борту МКС, по желанию оператора (например, перенос огнетушителя на другое место, перемещение оператора с фонариком по темному коридору станции); изменение состояния объектов (оператор открывает (закрывает) двери, выдвигает (задвигает) ящики, включает свет, нажимает кнопки на пультах управления).

Перед началом моделирования преподаватель (инструктор), а при самостоятельной работе сам обучаемый должен включить компьютер, загрузить операционную систему и запустить управляющую программу. Для задания параметров начальной сборки используется отдельное диалоговое окно "Выбор варианта компоновки виртуального мира", которое позволяет устанавливать перечень загружаемых макрообъектов (состав модулей, внешний вид и интерьер), задавать исходные данные, которые определяют параметры систем и начальное состояние моделей. Полный состав моделей включает модули Российского сегмента (транспортный корабль, модуль "Звезда", стыковочный отсек "Пирс", модуль "Заря" и грузовой корабль), модули американского сегмента ("UNITY", шлюзовая камера "AirLock", лабораторный модуль "LAB", внешние фермы с солнечными батареями и радиаторами системы терморегулирования), а также вспомогательное оборудование (канадский манипулятор, мобильный транспортер и переходные модули – адаптеры).

После загрузки выбранной конфигурации появляется интерфейсное окно с трехмерным изображением станции и меню пользователя. С помощью меню оператор имеет возможность осуществлять настройки (изменять скорость перемещения, включать отображение по отдельным системам, отключать плоскости, вводить режим каркасного отображения загруженных в сцену объектов) и выбирать режимы (режим затенения, отображения воздушных потоков, изменения положения объектов и положения аватаров – других членов экипажа, если они работают в виртуальной среде одновременно с обучаемым).

После этого осуществляется запуск процесса моделирования. В результате

реализации моделей рассчитываются значения параметров движущихся тел, внутренние и выходные параметры функционирующих систем и воспроизводимых процессов, а также координаты тел, перемещаемых пользователем. Рассчитанные значения параметров характеризуют текущее состояние моделируемых процессов и заносятся в базу данных оперативного состояния. На их основе производится построение трехмерного изображения и формируется звуковое сопровождение на рабочих станциях обучаемого и преподавателя.

Средства системы позволяют наблюдать ответные реакции виртуального мира на воздействие оператора (загорается или гаснет свет, раздаются характерные звуки, изменяется положение тумблеров, изменяется информация на экране виртуального компьютера).

Для моделирования реакции объектов виртуальной среды на действия оператора и внешние воздействия реализованы алгоритмы перемещения и поворота отдельных объектов виртуального мира, изменения состава и интенсивности источников света, подмены одних объектов другими, изменения цвета объекта и др. Идентификация объекта, по отношению к которому производится какие-либо действия, происходит с помощью мыши, перчатки данных, либо внешней команды от модели бортовых систем.

При выдвижении ящиков, запанельного оборудования происходит поступательное перемещение объекта (ящика) с заданным шагом передвижения, определяющим скорость движения ящика. При переключении тумблера по поступающей команде производится подмена объекта вида "включен" на объект вида "выключен" (либо наоборот) и изменение цвета индикатора, отражающего состояние данного тумблера.

Для реализации перечисленных действий использовались два варианта взаимодействия оператора с виртуальным миром: с помощью оконного меню и с использованием шлема виртуальной реальности и перчатки данных.

При использовании клавиатуры и компьютерной мышки оператор подводит курсор мыши к активной зоне того объекта, с которым осуществляется взаимодействие, и нажимает либо кнопку мыши, либо соответствующую клавишу в зависимости от вида объекта и рода воздействия. При этом программные средства интерфейса определяют тип объекта, с которым происходит взаимодействие (дверь, тумблер, кнопка, рычаг и т.д.), и если это действие связано с логикой поведения выбранного объекта, то передают сообщение в комплекс моделирования бортовых систем. Соответствующая модель обрабатывает полученное сообщение и производит действия по изменению состояния виртуальных объектов в соответствии с логикой работы бортовых систем (например, включают сигнализаторы, осветители и т.д.).

Для реализации перемещения обучаемого космонавта в интерьере космической станции создана управляющая панель в виде немодального диалогового окна. Управляющая панель содержит 12 кнопок, при нажатии на одну из них происходит перемещение оператора в соответствии с указанным направлением (перемещение вдоль трех осей, изменение крена, тангажа и курса).

Эффект передвижения оператора в интерьере виртуального МКС и изменение направления обзора достигается в результате перемещения камеры в новую точку, координаты которой рассчитываются на основании реализации очередного цикла перемещения и изменения ориентации камеры. Скорость перемещения и поворота камеры регулируется параметрами "шаг перемещения".

14.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ В КОМПЬЮТЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ ДЛЯ ПРЕДТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ

Состав объектов виртуальной среды компьютерного комплекса для предтренажной подготовки космонавтов определяется объемом задач, реализуемых средствами комплекса. При создании комплекса виртуальный мир наращивался поэтапно. В настоящее время он включает виртуальные модели Российских и американских модулей МКС, описанных в собственных системах координат и в единой (глобальной) системе координат.

Так как программно-аппаратный комплекс СВР используется для отработки задач как внутри орбитальной станции, так и на внешней ее поверхности, то весь виртуальный мир условно разбивается на две части: внутренняя виртуальная среда (внутренний интерьер всех модулей с возможностью перехода между ними) и внешний вид всех модулей и связки модулей в рамках МКС в целом.

Геометрическая модель каждого модуля содержит параметрическое описание несущей конструкции (каркаса и обшивки) и связанного с ней бортового оборудования (элементов, узлов, приборов и систем).

Одним из факторов, определяющих эффективность системы имитации визуальной обстановки, является способ описания объектов в БД виртуального мира.

Структура баз данных виртуальной среды должна содержать следующие компоненты.

1. БД объектов виртуального мира, включающая описание положения и ориентации объектов в виртуальном мире, имена файлов геометрических моделей объектов с разной степенью детализации, число входных событий, на которые будет реагировать объект, описание поведения объекта – реакцию объекта на входные события.

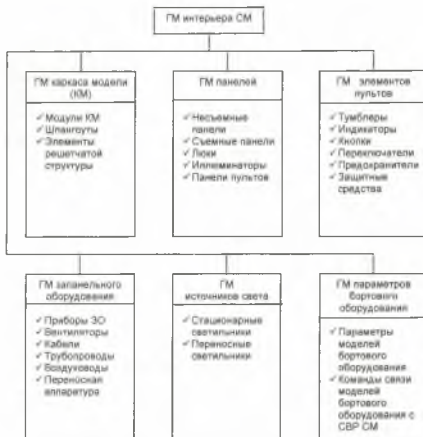


Рис. 14.2. Структура геометрической модели интерьера служебного модуля МКС

2. БД событий, описывающая входные воздействия, на которые будет реагировать объект.

3. БД свойств и реакций объекта на входные воздействия.

Свойство объекта – это набор инструкций, которые выполняются при наступлении соответствующего события.

Геометрические модели всех объектов построены на основе конструкторской документации; их размеры и ориентация соответствуют реальным элементам и узлам МКС.

В виртуальных модулях СМ и ФГБ МКС размещаются служебное оборудование и бортовые системы (жизнеобеспе-

чения, управления бортовым комплексом, ориентации солнечных батарей, энергоснабжения, обеспечения теплового режима, внутреннего освещения, стыковки, внутреннего перехода и др.). В зависимости от особенностей решаемых прикладных задач и характера возможных действий оператора объекты геометрической модели представляются как статические, так и динамические.

К статическим объектам относятся каркас, несущая поверхность внешнего вида (обшивка) и оборудование, которое жестко связано с несущей поверхностью МКС, каркасом, другими статическими объектами и не меняет своего видимого

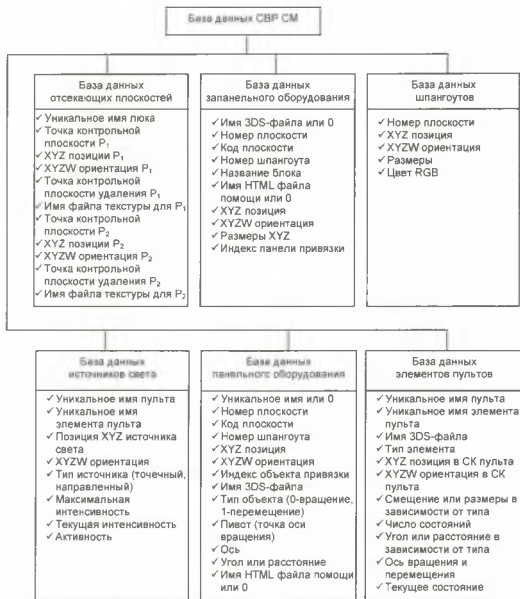


Рис. 14.3. Структура базы данных объектов для формирования интерьера модуля "Звезда" МКС

положения в течение периода проведения тренировки. Динамические объекты – объекты бортового оборудования, которые могут изменять свое положение, ориентацию и состояние (цвет, текстуру, конфигурацию) в зависимости от действий оператора.

На рис. 14.2 представлена структура геометрической модели (ГМ) интерьера служебного модуля МКС (модуля "Звезда"). Геометрические объекты СМ разделены на группы однотипных элементов, имеющих идентичную структуру описания в базе данных (элементы каркаса, па-

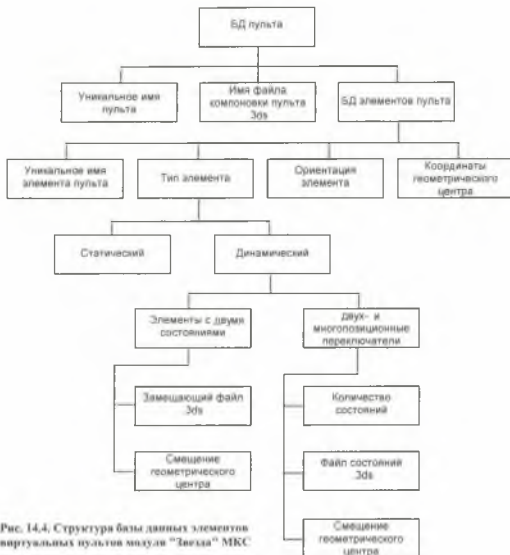


Рис. 14.4. Структура базы данных элементов виртуальных пультов модуля "Звезда" МКС

нели, элементов пультов, "запанельное" оборудование, источники света). К статическим объектам интерьера относятся шпангоуты, панели, шкафы, поручни, воздуховоды, трубопроводы, кабели, розетки, средства фиксации, основания приборных панелей пультов, средства коммуникации и ряд других объектов. Динамические объекты интерьера – перемещаемые панели, тумблеры, кнопки, переключатели, индикаторы, светильники, венти-

ляторы, переносная аппаратура, съемные элементы (противогазы, огнетушители) и т.д.

К статическим объектам внешнего вида могут быть отнесены несущая поверхность (элементы обшивки МКС, включая противометеоритную защиту), поручни, крепления, стационарные объекты бортового оборудования. К динамическим объектам внешнего вида относятся манипулятор, солнечные батареи, стыко-

вочные узлы, активные антенны с изменением геометрии, положения и ориентации, подвижные датчики, средства световой сигнализации и т.д.

В соответствии с управляющими воздействиями оператора и в процессе моделирования происходит изменение состояния соответствующих элементов внешнего вида, интерьера и оборудования (открытие/закрытие люков и панелей, открытие/закрытие дверей, крышек и ящиков, изменение ориентации антенн, изменение положения органов управления на виртуальных панелях пультов, включая имитацию замены предохранителей, переключение тумблеров, изменение положения ручек регулировки, включение индикаторов и т.д.). При этом изменение положения или ориентации некоторых объектов производится на основе геометрических преобразований средствами программного обеспечения СВР. Изменение состояний других объектов, таких как кнопки, переключатели, тумблеры, индикаторы удобно производить заменой текущей геометрической модели соответствующего элемента другой моделью, представляющей измененное состояние.

Структура базы данных объектов для формирования интерьера Служебного модуля МКС (модуля "Звезда") представлена на рис. 14.3.

В базе данных геометрической модели фиксируется имя объекта, привязка к плоскости стабилизации, а также к собственной системе координат пользователя, к несущему шпангоуту; координаты объекта в локальной системе координат; ориентация, привязка к панели или к другому объекту; имена детализированных и недетализированных файлов геометрических объектов, состояние, на котором происходит переход на другой уровень описания; тип загрузки динамического объекта; ссылка на .html файл справочной системы.

База данных шпангоутов описывает несущий каркас, на котором располагается панельное (навесное) оборудование. В

БД панельного оборудования описаны объекты, находящиеся в зоне непосредственной видимости интерьера: панели, шкафы с ящиками, корпуса пультов и т.д.

БД запанельного оборудования описывает объекты, которые скрыты и визуализируются при открытии соответствующей панели. БД элементов пультов описывает все объекты, которые расположены на корпусах пультов: тумблеры, галетные переключатели, диоды, предохранители, транспаранты, кнопки и т.д.

На рис. 14.4 приведена в качестве примера структура базы данных элементов виртуальных пультов Служебного модуля МКС (модуля "Звезда").

В БД источников света описываются связи виртуальных источников света с геометрическими моделями светильников, тип и характеристики яркости источников света.

Для описания объектов внешнего вида станции (люки, солнечные батареи, звенья бортовых манипуляторов) вводятся поля: имя файла геометрической модели объекта, положение объекта на внешней стороне обшивки, поле ориентации объекта в пространстве, поле типа объекта (статический объект, объект вращения, объект перемещения); для динамических объектов – поле величины изменения положения в зависимости от типа допустимого движения.

БД геометрических моделей объектов виртуального мира может быть представлена в виде текстового файла и иметь следующие поля: уникальное имя объекта, позиция объекта, ориентация объекта, количество геометрических моделей с разной степенью детализации, имена файлов с геометрическими моделями, количество входных событий, ссылки на описание событий в БД событий, количество свойств объекта, ссылки на описание свойств объекта в БД реакций объекта на входные воздействия, указатель на макрос объекта общего назначения, если такой существует.

Каждому входному воздействию на объект (событию, на которое он будет реагировать) соответствует описание поведения объекта – реакции на входное воздействие.

БД входных воздействий и БД свойств объекта описываются с помощью макросов, шаблонов инструкций, на которые будут ссылки из БД объектов виртуального мира.

Макрос, описывающий свойства объекта, будет выполняться при наступлении соответствующего события – воздействия на объект, описанного в БД событий для данного объекта. На вход этого макроса в качестве параметров подается набор (список) переменных, с которыми будут выполняться инструкции макроса.

Для описания поведения объекта без внешнего воздействия на него вводится макрос общего назначения для этого объекта, который выполняется в каждом цикле визуализации.

На рис. 14.5, 14.6 (см. цветную вкладку) приведены примеры фрагментов формируемых в системе виртуальной реальности изображений внешнего вида МКС.

Для освещения формируемой сцены в программе используются источники направленного и рассеянного света, включение (выключение) которых производится по командам от бортовых систем. Светильники, имитирующие работу световых приборов, размещены на внутренних поверхностях орбитальной станции. Дополнительный световой эффект создается возможностью использования направленного источника света (фонарика), который включается (выключается) по команде оператора.

Специфическими элементами виртуальной среды орбитальной станции МКС являются экраны дисплеев, на которые выводится информация с бортовых компьютеров. Вывод и смена изображения на экране виртуальных дисплеев произво-

дится по командам от бортовых систем и осуществляется посредством динамического формирования текстур этих объектов.

Создание геометрической модели модулей МКС потребовало сформировать базу данных объектов виртуальной среды общим объемом 260 Мбайт.

Основные технические параметры виртуальной МКС: количество геометрических объектов виртуальной среды – более 4000; динамических объектов – 850; количество моделируемых бортовых систем – 64 (объем программного обеспечения 196 Мбайт); количество полигонов геометрического описания объектов – 260 ... 380 тысяч.

В процессе эксплуатации производится постоянная модернизация, улучшение характеристик и наращивание возможностей комплекса. Реализована возможность выделения или удаления объектов, конструктивных элементов и плоскостей (рис. 14.7, см. цветную вкладку). Для наглядного отображения движения воздуха в зависимости от включенных вентиляторов отображаются возникающие в модулях станции воздушные потоки; контуры нескольких потоков представляются разными цветами.

Для имитации работы системы пожаробнаружения реализован режим задымления. Распространение дыма (рис. 14.8, см. цветную вкладку) происходит в соответствии с направлением движения воздуха. Признак возникновения очага пожара в заданном месте вводится с сервера моделирования. Далее моделируется срабатывание датчиков дыма на пульты системы пожаротушения, аварийная световая и звуковая сигнализация и отключение системы вентиляции; дым локализуется вокруг очага возгорания.

В качестве примера приведем еще одну задачу, отрабатываемую на базе комплекса и связанную с изучением методов ориентации солнечных батарей. Для обеспечения максимальной подзарядки



Рис. 14.9. Диалоговое окно

нормаль к активной поверхности солнечных батарей (СБ) должна быть направлена в сторону солнца. Операция ориентации СБ может осуществляться либо бортовым комплексом, либо оператором вручную.

Средства компьютерного комплекса дают возможность инструктору, используя диалоговое окно, показанное на рис. 14.9, поместить наблюдателя в произвольную точку пространства, задать по-

ложение станции, солнца и иллюстрировать эффективность различных способов управления ориентацией СБ и блоками радиаторов. Варианты различных ситуаций (значения углов разворота СБ) фиксируются в виде последовательности контрольных точек, записываемых в памяти компьютера. При нажатии кнопки "SUN" производится вычисление значений углов, при которых солнечные батареи направлены на солнце.

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХ ПОКОЛЕНИЙ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ

15.1. ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ ПО ПРОГРАММЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ "САЛЮТ"

В космической области тренажерные комплексы формировались по принципу полного обеспечения выполняемой программы космических полетов. Состав тренажеров для обеспечения подготовки экипажей по программе определялся таким образом, чтобы охватывать все используемые космические объекты (транспортные, грузовые корабли, базовый блок, модули станции) и весь комплекс задач, которые должны выполнять космонавты в процессе полета.

Первый в мире космический тренажерный комплекс, который в полной мере реализовывал принципы модульного построения тренажеров, изложенные в гл. 2–5, был создан и эксплуатировался в Центре подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина в рамках советской космической программы долговременной орбитальной станции (ДОС) "Салют" (1979 – 1985 гг.).

К тому времени в Советском Союзе уже имелся опыт создания космических тренажеров. Однако все они были автономными, а моделирование бортовых систем и среды в них осуществлялось с помощью аналоговых вычислительных машин. Одновременный переход от аналоговой вычислительной техники к цифровой и от автономных тренажеров к идеологии тренажерного комплекса послужили источниками создания новой технологии построения тренажеров для профессиональной подготовки операторов,

которая используется и развивается по сей день.

Реализация космической программы была ориентирована на использование ДОС "Салют-6" и "Салют-7" и транспортного корабля "Союз-Т".

Первый космический тренажерный комплекс, получивший название "Белладонна" (структурная схема этого тренажерного комплекса приведена на рис. 15.1), был разработан ОКТБ "Орбита" (головной разработчик) в кооперации с РКК "Энергия", ГК НЦП им. М.В. Хруничева, ММЗ "Вымпел" и другими предприятиями СССР. Тренажерный комплекс включал в себя комплексный тренажер орбитальной станции "Салют" (тренажер "Дон-17К") и специализированный тренажер сближения и стыковки транспортного корабля (тренажер "Дон-732").

Длительное пребывание экипажей на орбите обеспечивалось соответствующими бортовыми системами ДОС "Салют":

- ориентации и управления движением (СОУД), в том числе системы "Каскад";
- сближения "Игла-П";
- управления бортовым комплексом (СУБК), в том числе программно-временное устройство (ПВУ);
- объединенной двигательной установки (ОДУ);
- электропитания;
- связи "Заря", систем "Звук" и "Строка";
- телевизионных систем "Арктур" и "Кречет";
- жизнеобеспечения (СЖО);
- обеспечения теплового режима (СОТР).

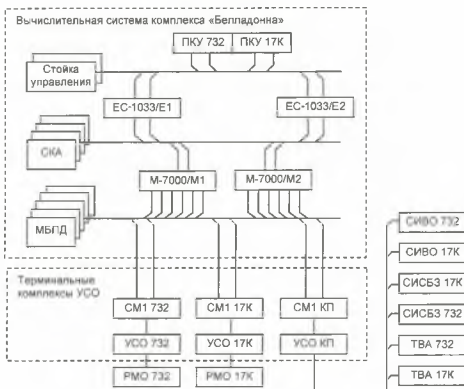


Рис. 15.1. Структура тренажерного комплекса ДОС "Салют" с входящими в него тренажерами "Дон-732" и "Дон-17К"

Например, система связи "Заря" – радиосвязь экипажа с землей; система "Звук" – громкую связь между членами экипажа; система телеграфной связи "Строка" обеспечивала прием на борт и печатание телеграфных сообщений, передаваемых по каналам связи системы "Заря".

Для выполнения экспериментов в космосе на станции устанавливалась различная научная аппаратура.

На комплексном тренажере орбитальной станции "Дон-17К" требовалось воспроизвести работу всех этих систем при автоматическом и ручном режимах управления в штатных и нештатных ситуациях. Кроме этого, необходимо было смоделировать динамику перемещения

космической станции в пространстве и внешнюю визуальную обстановку, которую наблюдал экипаж в иллюминаторах и с помощью приборов наблюдения станции.

Транспортный корабль "Союз-Т" использовался для доставки экипажа на орбитальную станцию и спуска экипажа на землю. Полеты этого корабля осуществлялись еще до создания орбитальной станции, и в ЦПК им. Ю.А. Гагарина уже существовал комплексный тренажер транспортного корабля. Одной из важных задач экипажа транспортного корабля, которая требовала высокого уровня профессиональной практической подготовки, всегда являлась операция стыковки. Поэтому было принято реше-

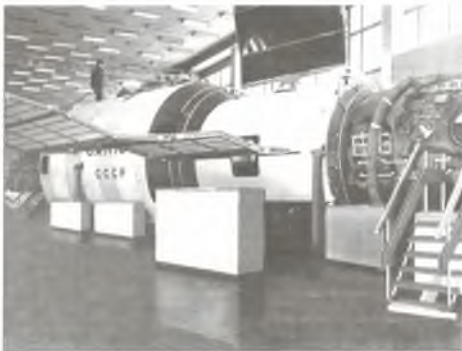


Рис. 15.2. Рабочее место космонавтов комплексного тренажера ДОС "Салют" ("Дон-17К")

нис о создании в составе тренажерного комплекса специализированного тренажера сближения и стыковки транспортного корабля – тренажера "Дон-732".

Так как при выполнении стыковки этот процесс сопровождают экипажи и транспортного корабля, и станции, то тренажеры этих космических объектов должны были работать одновременно (во взаимодействии). Это обстоятельство имело принципиальный характер с точки зрения интеграции данных тренажеров в единую систему.

Реализуя принципы формирования единых систем коллективного пользования, в рамках тренажерного комплекса были сформированы следующие функциональные системы:

- вычислительная система тренажерного комплекса;
- централизованная система имитации внешней визуальной обстановки;

- система управления тренировками;
- система имитации связи "Борт–Земля";
- система сопряжения ЭВМ с макетами ПКА и терминальным оборудованием.

Тренажерный комплекс "Белладонна" структурно содержал три уровня функциональной интеграции (см. рис. 15.1):

- верхний уровень – функционально-моделирующий, на базе двух ЭВМ ЕС-1033;
- средний уровень – коммутационный, на базе двух ЭВМ серии АСВТ М-7000, с адаптерами связи СКА (адаптеры 2К/2А) и модулем быстрой передачи данных (МБПД);
- нижний уровень – уровень терминальных комплексов УСО, построенный на базе средств АСВТ и СМ ЭВМ.

Комплекс рабочих мест операторов был построен на основе полноразмерного

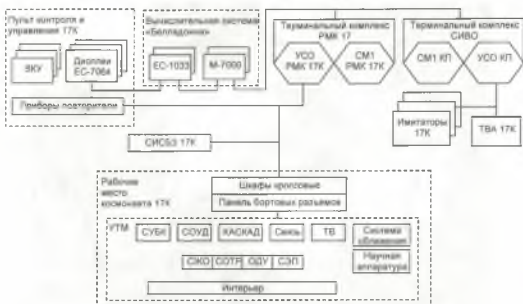


Рис. 15.3. Структура комплексного тренажера ДОС "Салют" ("Дон-17К")

спускаемого аппарата (СА) транспортного корабля с оборудованием для тренажера "Дон-732" и полноразмерного макета орбитальной станции "Салют" с оборудованием для тренажера "Дон-17К" (рис. 15.2).

Впервые в практике построения программного обеспечения космических тренажеров была достигнута функциональная специализация: общее математическое обеспечение (ОМО) было реализовано как самостоятельный продукт, обеспечивающий среду для функционирования прикладного программного обеспечения (математических моделей бортовых систем и среды).

Выбор в качестве центрального вычислительного ядра двух самых мощных (на период создания тренажерного комплекса) ЭВМ серии ЕС был обусловлен, во-первых, выполненными оценками вычислительных затрат, связанных с моделированием работы космических аппаратов и управления имитационными системами, во-вторых, необходимостью обеспечения

повышенной надежности работы комплекса на основе резервирования его модулей.

К ЕС ЭВМ были подключены терминалы ЕС-7064; на базе этих терминалов и приборов-повторителей формировались рабочие места инструкторов и инженеров – пульты контроля и управления тренировкой. Впервые в практике космического тренажеростроения часть приборов-повторителей были реализованы не аппаратно, а в виде графических изображений (форматов) на экранах ЕС-7064.

Терминальный комплекс УСР обеспечивал управление системами РМО и их сопряжение с вычислительной системой. Аналогичное по структуре УСР коллективного пользования (УСР КП) обслуживало имитаторы системы имитации визуальной обстановки, комплекс телевизионной аппаратуры и систему имитации связи "Борт-Земля".

Средний, коммутационный уровень вычислительной системы обеспечивал гибкую коммутацию информационных по-

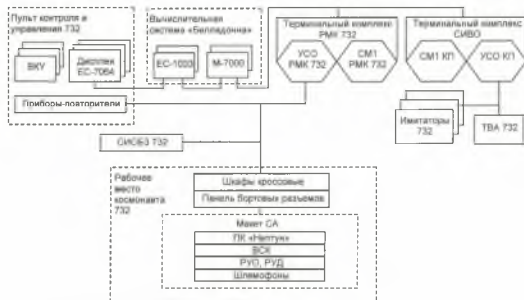


Рис. 15.4. Структура специализированного тренажера сближения и стыковки транспортного космического корабля "Союз-Т" ("Дон-732")

токов, включая информационное взаимодействие между двумя тренажерами при их совместной работе. Запуск функциональных процессов на функциональном и терминальном уровнях задавался тактовыми сигналами с коммутационных ЭВМ М-7000, что обеспечивало синхронность работы всех уровней тренажерного комплекса.

На рис. 15.3 приведена структура комплексного тренажера "Дон-17К".

Это был первый в мире комплексный тренажер орбитальной станции. Реализованный на базе полномасштабного учебно-тренировочного макета (УТМ) станции, он позволял изучать ее конструкцию, размещение бортового оборудования, а также проводить тренировки во всех рабочих зонах обитаемой части станции.

Бортовое оборудование, расположенное в УТМ ДОС "Салют", через кроссовые устройства было сопряжено с вычислительной системой и другими системами тренажерного комплекса "Белладонна".

Функциональный пакет моделирования объекта (ФП МОБ 17К) обеспечивал моделирование указанных выше бортовых систем станции.

Работа бортовой системы была смоделирована в объеме, достаточном для имитации их функционирования в РМО в штатных и прогнозируемых нештатных режимах полета. Так, функционирование реальной системы ОДУ было смоделировано в части приема и обработки команд управления, поступающих от моделей СУБК и СОУД.

Модель систем "Заря", "Строка", "Звук" обеспечивала организацию связи в соответствии с логикой работы штатных систем и сигнализацию об их работе на пультях в РМО в штатных и нештатных ситуациях.

В состав функционального пакета моделирования входила также модель движения, предназначенная для расчета параметров орбитального движения станции.

На рис. 15.4 показана структура специализированного тренажера сближения и

стыковки "Дон-732", которая во многом подобна структуре комплексного тренажера "Дон-17К".

Тренажер "Дон-732" обеспечивал подготовку экипажей к выполнению ручных режимов сближения, причаливания, облета, стыковки и перестыковки транспортного корабля "Союз-Т" с ДОС "Салют". Тренажерный комплекс предоставлял возможность совместных тренировок экипажей станции и транспортного корабля.

В качестве рабочего места космонавтов использовался макет спускаемого аппарата корабля "Союз-Т", оснащенный основным пультом космонавта (ПК "Нептун"), ручками управления ориентации (РУО) и движения (РУД), средствами связи и тренажерным вариантом прибора наблюдения ВСК.

Для имитации визуальной обстановки в целях экономии времени и финансовых средств были использованы ранее созданные оптико-механические имитаторы изображения Земли, звезд и объекта стыковки. В частности, для формирования изображения стыкуемого космического объекта ("Салют") использовался оптико-механический имитатор 162-К, который передавал изображение управляемого макета станции в прибор наблюдения оптического канала ВСК и, через телевизионную аппаратуру (ТВА) "Сайгак", в видеоконтрольное устройство (ВКУ) электронного канала наблюдения КЭИ.

Функциональный пакет моделирования объекта (ФП МОБ "Дон-732") позволял воспроизводить динамику совместного полета двух космических кораблей и работу бортовых систем транспортного корабля (СУБК, ОДУ, системы сближения "Игла" и др.), обеспечивающих моделирование процессов сближения, причаливания и стыковки в штатных режимах и в условиях возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

В табл. 15.1 приведены типовые задачи подготовки космонавтов, которые решались с помощью тренажерного комплекса "Белладонна".

За период эксплуатации комплексного тренажера "Дон-17К" всего было проведено 172 тренировки и подготовлено 22 экипажа космонавтов. Общая наработка составила 1720 часов.

Тренажер "Дон-732" эксплуатировался с июня 1982 года по январь 2000 года. За это время на нем было проведено 2185 тренировок. Общая наработка (с учетом регламентных работ) составляет 15000 часов. На тренажере прошли подготовку более 40 экипажей космонавтов.

Архитектура тренажерного комплекса "Белладонна" была несколько избыточной. Это позволяло, обслуживая два тренажера, проводить непрерывную модернизацию и наращивание количества тренажеров в составе комплекса путем добавления терминальных комплексов УСО для новых рабочих мест.

Проектом предусматривалась возможность расширения состава комплекса до 14 тренажеров, однако при организации новой космической программы было принято решение о создании аналогичного комплекса на базе более современных средств, которые появились в 1982–1985 г.

Терминальный комплекс РМО "Дон-732" и СМ КП, а также терминалы ПК У ЕС-7064 были в дальнейшем интегрированы в тренажерный комплекс следующего поколения "Ермак-27" и обеспечивали функционирование тренажера "Дон-732" в рамках программы ОК "МИР" фактически до ее окончания.

Важнейшим итогом разработки и эксплуатации тренажерного комплекса "Белладонна" стало построение и апробирование основ технологий тренажерных комплексов. Этот опыт был в полной мере использован при создании тренажерного комплекса по программе ОК "Мир".

**15.1. Основные задачи подготовки космонавтов на тренажерах,
включенных в комплекс "Белладонна"**

№ п/п	Наименование задачи подготовки	Наименование тренажера
1	Изучение экипажами натурального вида, конструкции и компоновки бортового оборудования	"Дон-17К", "Дон-732"
2	Проведение тренировок по формированию у экипажа правильных навыков управления станцией "Салют", ее системами и устройствами на всех этапах полета	"Дон-17К"
3	Проведение комплексных тренировок по полной программе полета на борту станции "Салют" и ее отдельным этапам полета (в любой последовательности)	"Дон-17К", "Дон-732"
4	Формирование и поддержание у космонавтов навыков по управлению транспортным кораблем и его системами при выполнении задач в режимах сближения, причаливания, облета, стыковки, расстыковки и расхождения с орбитальной станцией "Салют"	"Дон-732"
5	Формирование и поддержание у членов экипажа транспортного корабля умений и навыков в решении задач подготовки средств управления и систем транспортного корабля к выполнению полета, управлению кораблем в заданных инструктором режимах, в том числе с рабочего места в бытовом отсеке, обеспечение совместной работы членов экипажа на рабочих местах, оборудованных в спускаемом аппарате и бытовом отсеке	"Дон-732"
6	Обучение экипажей ведению радиообмена и внутренних переговоров	"Дон-17К", "Дон-732"
7	Обучение экипажей действиям при имитации отказов бортовых систем и при возникновении аварийных ситуаций	"Дон-17К", "Дон-732"

**15.2. ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ
ПО ПРОГРАММЕ ОК "МИР"**

Орбитальный комплекс "Мир" создавался как многоцелевая научная лаборатория, предназначенная для проведения самых различных экспериментов и исследований в интересах науки и народного хозяйства, в том числе астрофизических, геофизических и медико-биологических исследований, функциональных исследо-

ваний свойств веществ и освоения технологии производственных процессов, экономически выгодных для реализации на космических станциях, отработки методов контроля природных ресурсов и проведения различных прикладных экспериментов и исследований.

В состав пилотируемого орбитального комплекса "Мир" входили следующие космические аппараты:

– базовый блок долговременной орбитальной станции "Мир";

- транспортный корабль "Союз-ТМ";
- транспортный грузовой корабль "Прогресс";

- модули "Квант", "Квант-2", "Кристалл", "Спектр", "Природа".

Модуль "Квант" включал в свой состав дополнительные системы жизнеобеспечения и аппаратуру для исследования естественных космических объектов (их рентгеновского и ультрафиолетового излучения).

Модуль "Квант-2" создавался для увеличения мощности системы электроснабжения за счет ориентированных панелей солнечных батарей, обеспечения газового состава атмосферы комплекса, проведения экипажем санитарно-гигиенических процедур, выхода экипажа орбитальной станции через шлюзовой отсек для проведения работ снаружи станции и выполнения широкого круга народно-хозяйственных и научных задач.

Орбитальный модуль "Кристалл" был предназначен для увеличения мощности системы электроснабжения комплекса за счет двух ориентированных панелей солнечных батарей, проведения научных исследований и экспериментов при работе с научным оборудованием, находящимся на борту модуля, подготовки к стыковке и стыковки с орбитальными многоразовыми кораблями.

Модуль "Спектр" создавался для дооснащения космического комплекса "Мир" аппаратурой по программе "Мир-Шаттл", увеличения мощности системы электроснабжения комплекса, изучения верхних слоев атмосферы и природных ресурсов Земли, обеспечения газового состава атмосферы и внутреннего теплового режима комплекса.

Модуль "Природа" создавался для дооснащения космического комплекса "Мир" аппаратурой по программе "Мир-Шаттл", комплексного исследования и экологического мониторинга параметров атмосферы и поверхности Земли и прове-

дения экспериментов с научной аппаратурой по программе "Евromир".

Советская пилотируемая космическая программа "Мир" была первой в истории человечества космической программой, в ходе которой строительство космического аппарата осуществлялось на орбите более 15 лет. Для подготовки космонавтов к работе на орбитальной станции на различных этапах ее строительства был необходим комплекс тренажеров, который мог развиваться и расширяться параллельно с развитием орбитального комплекса. Решению этой задачи в полной мере соответствовала технология создания тренажерных комплексов на основе открытых модульных систем и средств коллективного пользования, описанная в разд. I.

Тренажерный комплекс, получивший название "Ермак-27", был дальнейшим развитием тренажерного комплекса "Белладонна". Он был разработан ОКБ "Орбита" (головной разработчик) в кооперации с РКК "Энергия", ГК НЦП им. М.В. Хруничева, ММЗ "Вымпел" и другими предприятиями СССР.

Тренажерный комплекс "Ермак-27" создавался для:

- наземного обучения и тренировки экипажей управлению орбитальной станцией "Мир", ее модулями, системами и устройствами при выполнении полетного задания в штатных режимах и предполагаемых нештатных ситуациях на всех этапах полета, работе с научной аппаратурой;

- формирования у экипажей пилотируемых космических аппаратов профессиональных навыков по управлению транспортным кораблем "Союз" в ручных режимах причаливания, стыковки и расстыковки, облета станции "Мир", контроля за работой бортовых систем в штатных и нештатных ситуациях.

15.2. Состав тренажерного комплекса по программе ОК "Мир"

Наименование тренажера	Моделируемый реальный объект
Комплексный тренажер "Дон-17КС"	Базовый блок ОК "Мир"
Комплексный тренажер "Дон-37КЭ"	Целевой модуль "Квант" ОК "Мир"
Комплексный тренажер "Дон-77КСТ"	Целевой модуль "Кристалл" ОК "Мир"
Комплексный тренажер "Дон-77КСД"	Целевой модуль "Квант-2" ОК "Мир"
Автономный комплексный тренажер "Дон-77КСО"	Целевой модуль "Спектр" ОК "Мир"
Автономный комплексный тренажер целевого модуля "Природа"	Целевой модуль "Природа" ОК "Мир"
Специализированный тренажер "Дон-ГП"	Главный пост управления базового блока ОК "Мир"
Специализированный тренажер "Дон-Союз-ТМ"	Спускаемый аппарат транспортного корабля "Союз-ТМ"
Специализированный тренажер "Выход"	Фрагменты шлюзовых отсеков и скафандры "Орлан"
Специализированный тренажер "Дон-21КС"	Средство перемещения космонавта в космосе ("летающее кресло")
Специализированный тренажер "Телеоператор"	Рабочее место ТОРУ базового блока ОК "Мир"

Для отработки взаимодействия экипажей с группой специалистов Центра управления полетом в составе тренажерно-моделирующего комплекса Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина был создан учебный центр управления полетом (рис. 15.5, см. цветную вкладку), в структуру которого был включен удаленный выносной пульт контроля и управления тренировками.

Тренажерный комплекс "Ермак-27" вводился в эксплуатацию поэтапно. После завершения его разработки в составе "Ермак-27" функционировало одиннадцать тренажеров (включая автономные тренажеры, построенные с использованием технологий тренажерных комплексов, табл. 15.2).

Структура тренажерного комплекса "Ермак-27" представлена на рис. 15.6.

Комплекс "Ермак-27" практически сохранил трехуровневую архитектуру тренажерного комплекса "Белладонна", однако общее математическое обеспечение (ОМО) вычислительной системы (ВС) комплекса было существенно переработано (описание ВС "Ермак-27" приведено в гл. 9).

При интеграции тренажера "Дон-732" из состава тренажерного комплекса "Белладонна" в среду "Ермак-27" были разработаны программы преобразования, позволившие повторно использовать ранее разработанные программные модули ФП МОБ и ФП СУТ.

Четыре ЭВМ верхнего уровня (ЕС-1045) обеспечивали одновременное проведение тренировок на любых четырех тренажерах, входящих в состав комплекса. Гибкость конфигурирования информационных потоков между вычислительны-

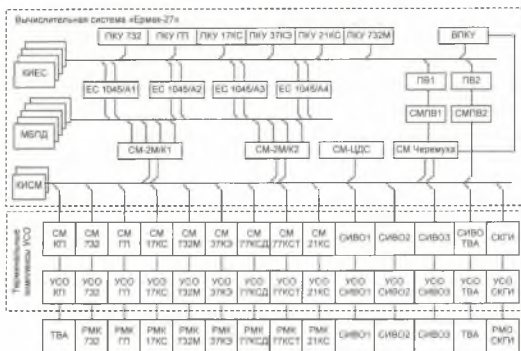


Рис. 15.6. Структура тренажерного комплекса для космической программы ОК "Мир" ("Ермак-27")

ми средствами верхнего уровня и терминальными комплексами обеспечивалась, как и в комплексе "Белладонна", двумя коммуникационными ЭВМ среднего уровня.

Комплекс рабочих мест операторов, построенный на основе полноразмерных макетов орбитальных модулей, был размещен таким образом, что космонавты могли свободно передвигаться из модуля в модуль в процессе тренировки (рис. 15.7, см. цветную вкладку), в том числе через переходные люки модулей. Это позволило обеспечить решение полетных задач, при выполнении которых задействовано оборудование разных орбитальных модулей.

В составе комплекса "Ермак-27" были реализованы системы и средства коллективного пользования, в соответствии с принципами, описанными в гл. 3.

Система управления тренировками (СУТ) обеспечивала автоматизированный

контроль и управление процессами всех тренировок с пультов контроля и управления, контроль работы и состояния моделей бортовых систем, контроль работы экипажей, запись процессов тренировок и их последующее воспроизведение на ПКУ.

В состав СУТ входят:

- пультовые подсистемы контроля и управления тренировками;
- подсистема автоматизированного контроля операторской деятельности;
- подсистема записи процессов тренировок и их воспроизведения.

СУТ "Ермак-27" включала в себя шесть комплексов ПКУ, т.е. не все тренажеры комплекса имели собственные ПКУ. Благодаря гибкой системе коммутации (с помощью коммутаторов КИЕС) ПКУ могли коммутироваться для работы с любыми из тренажеров комплекса. На пультах контроля и управления, входящих в состав тренажерного комплекса "Ермак-27",

уменьшилось количество приборов-повторителей в физическом исполнении – они были заменены соответствующими форматами. Так, для управления работой тренажеров "Дон-77КСД" и "Дон-77КСТ" обычно использовался любой из свободных пультов контроля и управления, так как все приборы-повторители для этих тренажеров были реализованы графическими форматами.

Учитывая большое количество разрабатываемых тренажеров, в составе комплекса "Ермак-27" на базе СМ-ЭВМ была создана централизованная диспетчерская служба (ЦДС), которая обеспечивала формирование требуемой конфигурации, централизованное управление, в том числе, переключением устройств в процессе функционирования, коммутацию информационных потоков и контроль состояния средств комплекса.

Централизованная система имитации внешней обстановки (ЦС ИВВО) обеспечивала воспроизведение визуальной космической обстановки в средствах наблюдения РМО и ПКУ. В состав ЦС ИВВО входили три терминальных комплекса СИВО, которые гибко коммутировались для работы с различными тренажерами комплекса.

В состав систем коллективного пользования были включены также:

- система имитации связи "Борт-Земля", предназначенная для имитации внешней связи с наземными пунктами, экипажами других ПКА и внутренней связи между членами экипажа;
- система психофизиологического контроля, предназначенная для оперативного контроля функционального состояния космонавтов в процессе тренировок на тренажерах комплекса, контроля работы космонавтов на основе физиологических сигналов, снимаемых со штатной медицинской аппаратуры, а также для регистрации сигналов и их дальнейшего анализа;

– система первичного электропитания тренажерного комплекса, обеспечивающая распределение первичного напряжения и преобразование электроэнергии первичной сети в напряжение постоянного и переменного тока с частотой 400 Гц с заданными электрическими параметрами, а также защиту сети от перенапряжения в цепях постоянного тока.

В процессе функционирования тренажерного комплекса "Ермак-27" выделялись следующие режимы работы комплекса:

- подготовка и запуск тренажерного комплекса;
- формирование тренажерного канала (каналов);
- функционирование тренажерных каналов (проведение тренировок);
- завершение работы тренажерного канала;
- восстановление тренажерного канала;
- воспроизведение тренировки;
- завершение работы тренажерного комплекса.

Рассмотрим особенности построения и использования некоторых тренажеров, входивших в тренажерный комплекс "Ермак-27".

Комплексный тренажер базового блока ОК "МИР" ("Дон-17КС")

Комплексный тренажер "Дон-17КС" с учетом его информационного сопряжения с тренажерами модулей предназначался для решения следующих задач подготовки космонавтов:

- изучение экипажами натурального вида, конструкции и компоновки бортового оборудования орбитального комплекса;
- проведение комплексных тренировок и обучение экипажей по выполнению программы полета;
- проведение тренировок экипажей по отработке навыков управления комплексом в различных режимах;

зано с системами коллективного пользования тренажерного комплекса "Ермак-27".

Управление процессом тренировки на тренажере осуществлялось с помощью средств пультов контроля и управления. При этом инструктор имел возможность следить за действиями экипажа, используя приборы-повторители ПКУ, а также по форматам контроля и отображения дисплейных пультов.

В период, когда создавался тренажерный комплекс "Ермак-27", в Центре подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина был создан учебно-командный пункт (аналог Центра управления полетом (ЦУП)). На базе тренажера "Дон-17КС" планировались и проводились комплексные тренировки, на которых отрабатывалось взаимодействие экипажа с операторами ЦУПа. При этом управление процессом тренировки осуществлялось с выносного ПКУ (ВПКУ), расположенного в территориально удаленном учебно-командном пункте.

Визуальная обстановка, наблюдаемая обучаемыми в тренажерных приборах наблюдения, выводилась на видеоконтрольные устройства (ВКУ), размещенные на ПКУ. По желанию инструктора на те же ВКУ могло быть выведено изображение с телекамер телевизионной системы наблюдения за действиями экипажа (ТСН).

Автоматизированный контроль правильности функционирования технических средств тренажера и подготовка его к работе осуществлялась под управлением ЦДС.

Данные о физиологическом состоянии операторов в процессе тренировки регистрировались и выводились на пульты врача (ПВ1 и ПВ2), входящие в состав системы психофизиологического контроля.

Цепи управления, сигнализации и питания оборудования РМО коммутировались в кроссовых шкафах (ШКР). Кабельная сеть рабочего места космонавта была выведена на панель бортовых разъ-

мов (ПБР) для ее подключения к наземному оборудованию.

Кроме штатной системы вентиляции в РМО имелась принудительная вентиляция для обеспечения физиологических и гигиенических условий работы экипажа.

СМО тренажера обеспечивало решение следующих задач:

- моделирования динамики полета;
- моделирования работы штатных бортовых систем;
- формирования информации для СУТ и управления ЦСВВО;
- проверки технического состояния тренажера.

Специальное математическое обеспечение было организовано по модульному принципу и оформлено в пакет прикладных программ моделирования.

Моделирование системы управления движением (СУД), а также устройства индикации и выдачи команд (УИВК) и информационной системы "Стрела", осуществлялось с применением штатного оборудования – бортового цифрового вычислительного комплекса.

Модель СУД обеспечивала решение задач построения и поддержания ориентации ОК "Мир" и ее связей в орбитальной, инерциальной, гравитационной и произвольно-заданной системах координат, выполнение программных разворотов и возврат в исходное положение, обеспечение коррекции орбиты станции и ее связей, обеспечение сближения базового блока с транспортными и грузовыми кораблями и исследовательскими модулями, решение различных навигационных задач и др.

Средствами ФП МОБ "Дон-17КС" обеспечивалось также моделирование других бортовых систем станции (системы управления бортовым комплексом СУБК, объединенной двигательной установки ОДУ, системы жизнеобеспечения СЖО, системы обеспечения теплового режима СОТР, системы ориентации солнечных батарей СОСБ, системы стыковки

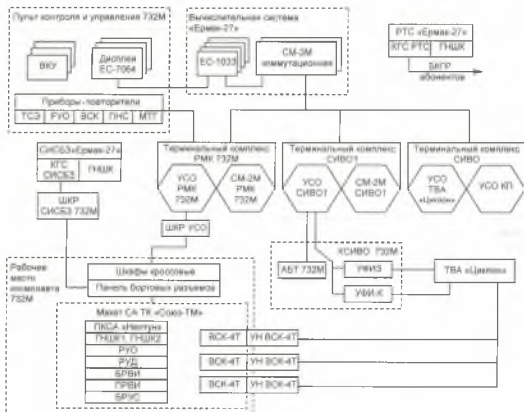


Рис. 15.10. Структура специализированного тренажера сближения, прицеливания и стыковки "Дон-Союз-ТМ"

и внутреннего перехода ССВП, системы электропитания СЭП, системы бортовых измерений СБИ, системы телефонно-телеграфной связи СТТС и др.)

С использованием средств СИВО можно формировать динамические комбинированные сюжеты, соответствующие моделируемой ситуации во всех основных приборах наблюдения и иллюминаторах базового блока ОК "Мир", в том числе в визире широкоугольным с точной вертикалью ВШТВ, визуальном ночном астроориентаторе ВНОК, визире пилота ВП-2, астроориентаторе АСВ-1 и секстанте С-3.

Основными носителями изображений являлись оптико-механические устройства: УФИЗ (устройство формирова-

ния изображения Земли), УФИКА (устройство формирования изображения космического аппарата), а также систем синтезированного изображения "Сфинкс" (формирование изображения звездного неба). Управление УФИЗ, УФИКА и системой "Сфинкс" осуществлялось с использованием управляющих вычислительных машин типа СМ-2М, связанных с тренажерной вычислительной системой.

Изображения наблюдаемых объектов (ПКА, звезд, Земли), формируемые унифицированными носителями (УН), передавались в приборы наблюдения с использованием средств телевизионной аппаратуры (ТВА) "Циклон". Телевизионная аппаратура "Циклон" обеспечивала пере-

дачу комбинированных телевизионных сюжетов в приборы наблюдения и иллюминаторы рабочего места космонавта через устройства оптического сопряжения (УОС).

Комплексные тренажеры других орбитальных модулей в составе комплекса "Ермак-27" ("Дон-37КЭ", "Дон-77КСД", "Дон-77КСТ") были построены по аналогичной схеме и решали соответствующие задачи в части работы с установленным на них бортовым оборудованием и научной аппаратурой.

Специализированный тренажер сближения и стыковки транспортного корабля "Союз-ТМ" ("Дон-Союз-ТМ")

Специализированный тренажер "Дон-Союз-ТМ" создавался в составе тренажерного комплекса "Ермак-27" и был предназначен для подготовки экипажей космонавтов к выполнению ручных режимов сближения, причаливания, облета, стыковки и перестыковки транспортного корабля "Союз ТМ" с ОК "Мир" и контролю автоматических режимов выполнения этих операций. В дальнейшем этот тренажер был доработан и вошел в состав комплекса тренажеров Российского сегмента МКС.

В качестве рабочего места космонавтов использовался модуль спускаемого корабля "Союз-ТМ", оснащаемый пультом космонавта (ПК "Нептун-М"), ручками управления ориентации РУО и движения РУД, средствами связи и тренажерным вариантом прибора наблюдения ВСК (рис. 15.9, см. цветную вкладку).

Структура специализированного тренажера сближения, причаливания и стыковки "Дон-Союз-ТМ" приведена на рис. 15.10. Идеологически она повторяет структуру тренажера "Дон-17КС", и мы не будем ее подробно описывать. Отметим лишь, что в рамках технологии тренажерных комплексов специализированные и комплексные тренажеры различного назначения строятся аналогичным образом.

Специализированный тренажер внекорабельной деятельности космонавта "Выход"

Специализированный тренажер "Выход" был предназначен для комплексной отработки космонавтами рабочих операций по подготовке скафандров и средств шлюзования к выходу в открытый космос, по управлению системами скафандра и выполнению циклограмм шлюзования.

Тренажер обеспечивал решение следующих задач:

- одновременное проведение тренировки двух космонавтов, находящихся в тренажерных скафандрах "Орлан-Т";
- управление системами скафандров в штатных режимах и нештатных ситуациях на всех этапах шлюзования;
- управление космонавтами бортовым оборудованием и средствами шлюзовых отсеков;
- перемещение космонавтов в скафандрах в рабочих зонах тренажера за счет своих мышечных усилий.

Рабочее место космонавта тренажера "Выход" было построено на основе комплекта скафандров в тренажном исполнении "Орлан-Т" и фрагментах макетов шлюзовых отсеков (рис. 15.11, см. цветную вкладку).

Скафандры подвешивались в пневматическом устройстве обезвешивания, обеспечивавшем свободное перемещение космонавтов в рабочих зонах тренажера.

В состав тренажера входили также следующие узлы системы:

- пульт контроля и управления тренажером;
- вычислительная система;
- система моделирования объекта;
- устройство сопряжения с объектом;
- система медицинского контроля;
- система связи;
- телевизионная система наблюдения;
- система электропитания.

На тренажере "Выход" моделировалась работа автономной системы обеспечения жизнедеятельности скафандров

"Орлан-Т", бортовой системы обеспечения жизнедеятельности космонавтов в скафандрах и средств шлюзовых отсеков, обеспечивающих выход в открытый космос.

Специализированный тренажер "Выход" был реализован как автономный тренажер. Он включал в себя полный набор тренажерных систем и не использовал средства коллективного пользования тренажерного комплекса "Ермак-27". Вместе с тем, построение тренажера на основе тех же принципов, которые использовались при создании тренажеров в составе тренажерных комплексов, позволило использовать в нем аппаратные и программные модули, идентичные модулям тренажерного комплекса, а также сократить сроки его проектирования и ввода в эксплуатацию.

Результаты разработки и эксплуатации тренажерного комплекса по программе ОК "Мир"

В табл. 15.3 приведен график ввода и основные результаты эксплуатации тренажерного комплекса "Ермак-27". При его разработке была успешно выполнена задача поэтапного строительства и ввода в эксплуатацию тренажеров для всесторонней подготовки космонавтов на основе заблаговременно спроектированной и созданной инфраструктуры, систем и средств коллективного пользования тренажерного комплекса "Ермак-27".

За годы существования ОК "Мир" (с 1986 г. по январь 2001 г.) на базе тренажерного комплекса была осуществлена подготовка всех экипажей российских и иностранных космонавтов, выполнивших

15.3. График ввода и результаты эксплуатации тренажерного комплекса "Ермак-27"

Наименование тренажера	Введен в эксплуатацию	Количество тренировок	Наработано часов
Специализированный тренажер "Дон-Союз-ТМ"	Февраль 1986 г.	1180	2360
Комплексный тренажер "Дон-17КС"	Апрель 1986 г.	2009	12377
Комплексный тренажер "Дон-37КЭ"	Май 1987 г.	792	2560
Специализированный тренажер "Дон-ГП"	Сентябрь 1988 г.	215	984
Комплексный тренажер "Дон-77КСД"	Январь 1989 г.	960	2965
Комплексный тренажер "Дон-77КСТ"	Март 1990 г.	876	2631
Специализированный тренажер "Выход"	Апрель 1991 г.	531	1754
Специализированный тренажер "Телескопатор"	Июль 1992 г.	429	5343
Автономный комплексный тренажер целевого модуля "Природа"	Декабрь 1994 г.	212	2000
Автономный комплексный тренажер "Дон-77КСО"	Март 1996 г.	187	1900
Специализированный тренажер "Дон-21КС"	Июнь 1998 г.	334	1200

полеты при реализации космических программ "Мир", "Мир-Шаттл", "Мир-НАСА". Всего по этим программам было подготовлено 62 экипажа для полета на борту ОК "Мир", из них 31 экипаж выполнил космический полет. В составе международных экипажей на борту ОК "Мир" работали представители 10 зарубежных стран (Австрии, Афганистана, Болгарии, Великобритании, Германии, Сирии, Словакии, США, Франции и Японии). За время существования станции было выполнено 24 международных космических полета.

15.3. ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ ПО ПРОГРАММЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Еще одним убедительным примером, подтверждающим преимущества модульного принципа построения и интеграции всех тренажерных средств в единый тренажерный комплекс, стала разработка и создание средств подготовки космонавтов и астронавтов по программе МКС в РГНИ-ИЦПК им. Ю.А. Гагарина.

На базе международной космической станции планируется широкая программа исследований с использованием научной аппаратуры, разработанной в различных странах. Экипажи космонавтов МКС должны выполнять задачи, связанные с проведением астрофизических исследований, исследований атмосферы и земной поверхности, фундаментальных медико-биологических исследований, связанных с изучением организма человека в условиях космического полета, производства материалов и биопрепаратов в условиях микрогравитации и др.

На комплекс тренажеров Российского сегмента МКС возлагались функции обеспечения начала развертывания и эксплуатации МКС, поддержания орбиты МКС, построения и поддержания ориентации МКС на всех этапах развертывания и эксплуатации, прием, хранение и расходование топлива и обеспечение жизнедеятельности трех – шести членов экипажа.

Разработка и строительство в РГНИ-ИЦПК им. Ю.А. Гагарина комплекса тренажеров Российского сегмента МКС ведется с 1995 г. по настоящее время Центром тренажеростроения и подготовки персонала (головной разработчик) в кооперации с РКК "Энергия", ГК НЦП им. М.В. Хруничева и другими отечественными и зарубежными партнерами.

За время, прошедшее с момента создания тренажерного комплекса "Ермак-27" (1985 г.) и до момента проектирования тренажерного комплекса МКС (эскизный проект принят в декабре 1995 г.), произошли кардинальные изменения в построении функциональных систем космических тренажеров в связи с совершенствованием существующих и использованием новых аппаратных и программных компонентов.

Более четко было определено понятие промежуточного программного обеспечения, что позволило создать интегрированную среду разработки и поддержки функционирования прикладных процессов моделирования и пользовательского интерфейса, описанную в гл. 9.

На смену оптико-механическим и оптико-телевизионным имитаторам пришли системы компьютерного синтеза визуальных сюжетов.

Построение терминальных вычислительных комплексов сопряжения с оборудованием на базе промышленных крейтовых систем позволило повысить степень их интеллектуальности и отказаться от обязательного присутствия оперативного персонала ТВК УСО при проведении тренировок на комплексе.

Появление персональных ЭВМ высокой производительности с развитым графическим интерфейсом дало возможность полностью отказаться от физических приборов-повторителей.

Все это позволило существенно развить технологию создания тренажерных комплексов и модернизировать архитектуру их вычислительных систем (см. гл. 9).

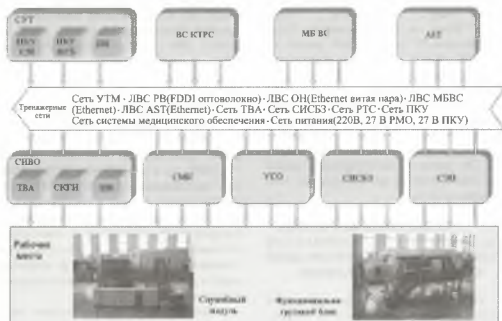


Рис. 15.12. Обобщенная структура тренажерного комплекса PC MKC с входящими в него комплексными тренажерами модулей "Заря" и "Звезда"

На рис. 15.12 показана обобщенная структура тренажерного комплекса Российского сегмента MKC с входящими в него комплексными тренажерами Служебного модуля (CM) и Функционально-грузового блока (ФГБ). В состав комплекса позднее был введен также тренажер американского сегмента AST, разработанный американскими партнерами.

Особенностью комплекса является высокая степень интеграции его систем. В частности, тренажеры имеют общую систему моделирования, в составе комплекса работает общая модель бортовой вычислительной системы (МБВС), а управление бортовым оборудованием осуществляется единым терминальным комплексом YCO, компьютеры которого объединены в собственную терминальную вычислительную сеть и имеют общий выход в сеть вычислительной системы комплекса.

Несмотря на то, что в ходе тренировки терминальный комплекс YCO не тре-

бует обслуживания оператором, в его состав входит пульт инженера (ПИ), обеспечивающий технологические работы на терминальном комплексе.

Как и в ранее создаваемых комплексах, в составе средств коллективного пользования были сформированы системы: медицинского контроля, имитации визуальной обстановки, управления тренировкой с двумя пультами контроля и управления и пультом инженера.

Интеграция элементов в системы и систем в рамках тренажеров осуществляется с помощью сетей тренажерного комплекса, основными из которых являются:

- сеть учебно-тренировочного макета;
- сеть электропитания;
- локальная вычислительная сеть реального времени (ЛВС РВ);
- ЛВС общего назначения (ЛВС ОН);
- ЛВС МБВС;
- ЛВС YCO;
- ЛВС имитатора американского сегмента (ЛВС AST);

15.4. Состав тренажерного комплекса Российского сегмента МКС

Наименование тренажера	Моделируемый реальный объект
Комплексный тренажер СМ	Модуль "Звезда" МКС
Комплексный тренажер ФГБ	Модуль "Заря" МКС
Специализированный тренажер "Дон-Союз-ТМА"	Спускаемый аппарат транспортного корабля "Союз-ТМА"
Специализированный тренажер "Выход-2"	Фрагменты шлюзовых отсеков и скафандры "Орлан"
Специализированный тренажер "Телеоператор-2"	Рабочее место ТОРУ модуля "Звезда" МКС

- сеть телевизионной аппаратуры (ТВА);
- сеть системы имитации связи;
- сеть ремонтно-технологической связи;
- сеть системы медицинского контроля.

Состав тренажерного комплекса Российского сегмента МКС (на 1 января 2005 г.) приведен в таблице 15.4. Струк-

тура тренажерного комплекса МКС является открытой для создания на его базе и в составе тренажеров других модулей, которые предусматривается создавать в рамках дальнейшего расширения состава МКС.

Рассмотрим особенности построения и использования некоторых тренажеров, входящих в тренажерный комплекс РС МКС.



Рис. 15.14. Унифицированный пульт контроля и управления тренажерного комплекса МКС (ПКУ модуля "Звезда")

Комплексный тренажер служебного модуля (СМ МКС)

Тренажер предназначен для подготовки экипажей космонавтов и астронавтов по выполнению программы полета при работе на борту модуля "Звезда" российского сегмента МКС.

На тренажере обеспечивается решение следующих задач подготовки:

- проведение тренировок экипажей по отработке навыков управления комплексом при выполнении динамических операций и других совместных работ, а также проведение комплексных тренировок и обучение экипажей выполнению программы полета в целом;
- проведение тренировок экипажей по отработке навыков работы с аппаратурой при выполнении исследований и экспериментов по программе полета;
- отработка навыков выполнения монтажно-демонтажных работ, операций технического обслуживания аппаратуры и систем изделия;
- отработка навыков по расконсервации и консервации комплекса;
- отработка практических навыков по работе с бортовыми системами;
- отработка действий экипажа в нештатных ситуациях, в том числе и при разгерметизации жилых отсеков СМ и пристыкованных модулей;
- проведение мультисегментных тренировок совместно с имитатором американского сегмента (AST);
- отработка бортовой документации.

В составе тренажера имитируется работа следующих бортовых систем:

- бортовой вычислительной системы;
- системы управления движением и навигацией;
- системы управления бортовой аппаратурой;
- объединенной двигательной установки;
- бортового радиотехнического комплекса (системы телефонно-телеграфной

связи, телевизионной системы, системы ЛИРА, системы РЕГУЛ);

- системы электропитания;
- системы ориентации солнечных батарей;
- системы управления приводами антенны;
- системы обеспечения теплового режима;
- систем обеспечения жизнедеятельности (СРВ-К2М, РОДНИК, СИГНАЛ ВМ, СОА "ВОЗДУХ", ЭЛЕКТРОН-ВМ, БМП, АСУ);
- система стыковки и внутреннего перехода;
- бортовой информационно-телеметрической системы.

Работа тренажера обеспечивается системами коллективного пользования тренажерного комплекса (вычислительная система, системы управления тренировкой, имитации связи "Борт-Земля", имитации визуальной обстановки, медицинского контроля, ремонтно-технологической связи, электропитания). Надо отметить, что в свою очередь системы тренажера Служебного модуля являются базовыми для обеспечения функционирования и интеграции с тренажерами других модулей в единый комплекс тренажеров МКС.

В качестве рабочего места космонавтов используется полномасштабный макет Служебного модуля МКС, оснащенный пультовым оборудованием в тренажном исполнении и габаритными макетами блоков. Внешний вид и интерьер рабочего места космонавтов по отделке, окраске, освещенности, расположению оборудования, органов управления соответствуют штатному изделию (рис. 15.13, см. цветную вставку).

Все органы управления, контроля и индикации бортовых систем и оборудования аналогичны соответствующим штатным по динамическим, светотехническим, функциональным, габаритным, цветовым характеристикам и пространственному размещению. На органах управления сис-

тем и агрегатов, не имеющих электрических сигналов об их состоянии, установлены тренажерные электрические датчики положения, сигналы с которых поступают в систему моделирования. Крепежные детали и узлы, а также способ подключения аппаратуры к бортовым системам модуля соответствуют штатным (за исключением специально оговоренных случаев).

Для наблюдения за действиями экипажа, находящегося внутри рабочего места космонавтов, установлены нештатные телекамеры.

Макет модуля оборудован технологическим входом, обеспечивающим удобство доступа экипажа и обслуживающего персонала внутрь объема макета, и экстренное покидание его в случае возникновения аварийных ситуаций.

Для обеспечения проведения монтажных, отладочных и проверочных работ формируется технологический канал связи между операторами рабочих мест тренажера (ПКУ, РМО, УСО, ВС, ТВС, СИВВО).

В рабочем месте космонавтов предусмотрено технологическое отверстие для подсоединения воздуховода кондиционера. Внутри РМК поддерживается температура в диапазоне 18 ... 23 °С при длительном (более 2-х часов) пребывании в нем обучаемых при закрытых технологических и штатном входах.

Унифицированный пульт контроля и управления ПКУ СМ (рис. 15.14) является средством коллективного пользования и позволяет управлять тренировкой на тренажерах комплекса. В нижнем ряду дисплеев расположены мониторы инструкторов, на которые выводятся графические панели-повторители пультавого оборудования борта и пульт инженера (левое рабочее место). Средний ряд дисплеев служит в качестве повторителей дисплеев штатных бортовых компьютеров Laptop. В верхнем ряду располагаются ВКУ, на которые могут быть коммутированы сюжеты, наблюдаемые космонавтами в при-

борах наблюдения, или изображения с телекамер наблюдения за действиями операторов.

В отдельном конструктиве в зоне ПКУ размещен также пульт врача, оборудованный средствами регистрации физиологической информации с комплексом аппаратуры медицинского контроля и медицинских обследований.

Комплексный тренажер Служебного модуля МКС эксплуатируется в РГНИИ-ЦПК им. Ю.А. Гагарина с августа 1998 г. по настоящее время. Благодаря заблаговременно созданной инфраструктуре комплекса, впервые в истории отечественной космонавтики комплексный тренажер служебного модуля МКС был создан и сдан в эксплуатацию раньше полетного изделия. Это позволило провести тренировки первых экипажей космонавтов и астронавтов и обеспечило высокое качество их подготовленности к полету.

Комплексный тренажер функционально-грузового блока (ФГБ МКС)

Тренажер предназначен для подготовки экипажей космонавтов и астронавтов по выполнению программы полета при работе на борту модуля "Заря" Российского сегмента МКС.

Тренажер ФГБ, с учетом его информационного сопряжения с тренажерами других модулей, имитатором БВС и имитатором американского сегмента (AST), предназначен для:

- проведения комплексных тренировок и обучения экипажей МКС для выполнения программы полета;
- проведения тренировок экипажей по отработке навыков управления комплексом в различных режимах;
- проведения многосегментных тренировок;
- проведения тренировок экипажей по отработке навыков работы с научной аппаратурой при выполнении исследований и экспериментов по программе полета;

- проведения тренировок экипажей по работе с бортовыми системами в штатных и предполагаемых нештатных ситуациях;
- проведения тренировок экипажей по действиям в случае разгерметизации жилых отсеков ФГБ и других модулей и при возникновении пожара;
- проведения тренировок экипажей по выполнению медико-биологических экспериментов, отработке операций при работе со средствами медицинского обеспечения;
- изучения экипажами натурального вида ФГБ и его бортового оборудования;
- отработки навыков выполнения монтажно-демонтажных работ, операций технического обслуживания и ремонта аппаратуры и систем изделия;
- обучения экипажей методике проведения кинофотосъемок и телерепортажей с использованием видеокомплекса в интерьере изделия;
- обучения ведению радиообмена и внутренних переговоров в штатных и нештатных ситуациях;
- отработки бортовой документации;
- отработки методик тренировки экипажей;
- проведения занятий по техническому обслуживанию и ремонту на внешней поверхности модуля.

Ряд систем тренажера ФГБ функционирует на базе и с использованием систем тренажера СМ. Так, система моделирования объекта ФГБ, устройства сопряжения с бортовым оборудованием ФГБ, пульт контроля и управления ФГБ интегрированы с аналогичными системами комплексного тренажера Служебного модуля МКС и образуют единую среду. В состав комплекса введен дополнительный пульт контроля и управления ПКУ ФГБ, который используется в качестве резервного или для увеличения состава рабочих мест инструкторов, которые участвуют в проведении тренировки.

В качестве рабочего места космонавтов используется полномасштабный макет

модуля "Заря", оснащенный пультовым оборудованием в тренажном исполнении и габаритными макетами блоков. Внешний вид и интерьер рабочего места космонавтов комплексного тренажера ФГБ (модуля "Заря") по отделке, окраске, освещенности, расположению оборудования, органов управления соответствуют штатному изделию (рис. 15.15, см. цветную вкладку).

Тренажер введен в эксплуатацию в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина с августа 1998 года и эксплуатируется по настоящее время.

С момента начала своей эксплуатации тренажерный комплекс Российского сегмента МКС является базовым средством подготовки для всех экипажей МКС, отечественных и иностранных космонавтов и астронавтов.

15.4. ИТОГИ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХ ПОКОЛЕНИЙ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ

В период с 1980 по 2000 гг. в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина созданы и введены в эксплуатацию три поколения тренажерных комплексов для подготовки экипажей космонавтов (состав комплексов показан на рис. 15.16), которые реализуют принципиально новую концепцию и технологию построения тренажных средств подготовки космонавтов на основе типовых унифицированных модулей, объединяемых в рамках интегрированных систем коллективного пользования. Эти принципы сохранялись и развивались при создании каждого последующего комплекса.

Можно утверждать, что только благодаря предложенным новым принципам, концепции, методологии и технологии разработки и создания тренажерных средств для подготовки космонавтов удалось не только создать три уникальных тренажерных комплекса нового поколения, но и в среднем вводить в эксплуата-

Тренажерный комплекс ДОС "Салют"		
Дон-17К	Комплексный тренажер ДОС "Салют"	1980
Дон-732	Специализированный тренажер сближения и стыковки транспортного корабля "Союз-Т" с ДОС "Салют"	1984
Тренажерный комплекс ОК "Мир"		
Дон-17К	Комплексный тренажер базового блока	1986
Дон-37КЭ	Комплексный тренажер целевого модуля "Квант"	1987
Дон-77КСТ	Комплексный тренажер целевого модуля "Кристалл"	1987
Дон-77КСД	Комплексный тренажер целевого модуля "Квант"	1988
Дон-ГП	Специализированный тренажер главного поста управления ОК "Мир"	1988
Дон-Союз-ТМ	Специализированный тренажер сближения и стыковки транспортного корабля "Союз-ТМ"	1988
Дон-21КС	Специализированный тренажер по управлению СПК	1989
Телеоператор	Специализированный тренажер по операциям ТОРУ	1993
Дон-77КСО	Комплексный тренажер целевого модуля "Спектр"	1995
Выход	Специализированный тренажер внекорабельной деятельности	1995
	Комплексный тренажер целевого модуля "Природа"	1996
Тренажерный комплекс МКС		
СМ, ФГБ	Компьютерный класс на базе системы виртуальной реальности МКС	1997
ФГБ	Комплексный тренажер функционально-грузового блока российского сегмента МКС	1997
СМ	Комплексный тренажер служебного модуля российского сегмента МКС	1997
Выход-2	Специализированный тренажер операций по внекорабельной деятельности	1997
Дон-Союз-ТМА	Специализированный тренажер сближения и стыковки транспортного корабля "Союз-ТМА"	1998
Телеоператор-2	Специализированный тренажер по операциям ТОРУ	2000

Рис. 15.16. Состав трех поколений тренажерных комплексов для подготовки космонавтов в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина

цию ежегодно комплексный или специализированный тренажер для подготовки космонавтов, что ранее не представлялось возможным. За период с 1980 по 2000 гг. создано 19 комплексных и специализированных тренажеров.

Расчеты показали, что применение технологии создания тренажеров для подготовки космонавтов в составе тренажерных комплексов позволило на 30 % уменьшить стоимость тренажерных средств, сократить сроки создания тренажера на год и более, повысить эффективность их эксплуатации и модернизации.

Используемая при создании тренажерных комплексов для подготовки космонавтов технология позволяет эффективно применять ранее созданные технические и программные средства и осуществлять постоянное обновление средств с учетом современных научных и технических достижений.

Длительная эксплуатация тренажерных комплексов и тренажеров в РГНИИ-ЦПК им. Ю.А. Гагарина показала их высокое качество, надежность, легкость модернизации и удобство в эксплуатации. Например, на одиннадцати тренажерах

комплекса ОК "Мир" с 1980 по 2000 гг. было подготовлено 62 экипажа, проведено 7725 тренировок, наработано 34574 часов.

Принятые при создании космических тренажерных комплексов технические решения всегда соответствовали передовому мировому уровню и тенденциям в создании современных средств тренажерной техники. На момент ввода в эксплуатацию, каждый тренажерный комплекс не имел аналогов в мире. Комплекс тренажеров российского сегмента Международной космической станции по своим характеристикам и возможностям не только не уступает созданным специалистами США тренажерам Американского сегмента МКС, но и превосходит их по объему решаемых задач многофункциональной подготовки космонавтов (при многократно меньшей стоимости).

Созданные и эксплуатирующиеся в настоящее время в РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина тренажерные комплексы позволяют эффективно интегрировать в их структуры новые тренажеры для подготовки космонавтов и астронавтов будущих орбитальных модулей МКС.

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО И БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ТРАНСПОРТНОГО КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ "СОЮЗ-ТМА"

16.1. НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА БОРТУ ОРБИТАЛЬНОЙ МКС БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ "СОЮЗ-ТМА"

Излагаемый в монографии подход к построению средств тренажной техники может эффективно использоваться при создании не только тренажерных систем, но и автономных тренажеров, например таких, которые могут эксплуатироваться в удаленных точках либо на борту реального объекта, управлению которым обучается оператор. Об этом убедительно свидетельствует, в частности, успешный опыт создания на космодроме "Байконур" тренажера причаливания и стыковки транспортного корабля с орбитальной станцией.

Первая версия этого тренажера была создана для транспортного корабля "Союз" на основе использования таких же унифицированных аппаратных и программных модулей (имитаторов визуальной обстановки, пультов, моделей систем корабля и др.), которые использовались в тренажерных комплексах. Построение на принципах унификации и модульности позволило в последующем эксплуатировать тренажер в течение 15 лет, осуществляя его постоянную модернизацию, связанную с расширением его функциональных возможностей и появлением новых модификаций транспортного корабля ("Союз-Т", "Союз-ТМ", "Союз-ТМА"). В дальнейшем было принято решение осуществить разработку варианта мобильного тренажера транспортного корабля,

обеспечивающего отработку навыков выполнения всех основных этапов полета, включая выведение транспортного корабля, автономный орбитальный полет, операции в связке с МКС и спуск с орбиты.

Целесообразность создания такого тренажера была обусловлена повышением требований к полноте и качеству подготовки членов экипажей МКС, а также сокращением сроков их подготовки до одного года. Необходимо учитывать и длительные перерывы между тренировками, связанные с проведением учебных сессий экипажей в США. Все это привело к необходимости обеспечения высокой интенсивности и регулярности занятий, так как умение надежно выполнять ручные режимы управления транспортным кораблем непосредственно влияет как на безопасность экипажа МКС, так и на безопасность станции.

Использование транспортного корабля (ТК) в качестве корабля-спасателя для МКС предполагает знание всеми членами международного экипажа ОК МКС режимов расстыковки, штатного, резервного и срочного спуска на ТК. Однако, с учетом функциональной специализации отдельных членов экипажа и их национальной принадлежности в программе их подготовки закладывается разный уровень знаний систем корабля. Это прямым образом влияет на безопасность экипажа транспортного корабля при спуске ТК с орбиты.

Длительные сроки полета основных экспедиций на МКС делают особенно актуальным вопрос поддержания навыков

экипажей по управлению транспортным кораблем и транспортным грузовым кораблем (ТКГ) на основе использования бортовых тренажеров.

Таким образом, возникла задача построения простого в использовании, легкого и мобильного в развертывании тренажера, который должен обеспечивать формирование необходимых умений и навыков, в том числе на основе проведения дополнительных самостоятельных тренировок (в офисе космонавтов, в часы самоподготовки и личное время; во время учебных сессий экипажа в США и предстартовой подготовки на космодроме и на борту МКС).

При создании тренажера ставилась задача, во-первых, охватить по возможности все основные операции, выполняемые экипажем на различных этапах полета транспортного корабля, и, во-вторых, обеспечить преемственность навыков, приобретаемых космонавтом на разных этапах подготовки, в том числе, на этапе общекосмической подготовки, подготовки в группах, в составе экипажа по конкретной программе и экипажа космонавтов на борту корабля. Поэтому на базе одних и тех же средств формируется несколько версий тренажера: стационарный, мобильный и бортовой, отличающиеся объемом используемого оборудования.

В целях повышения эффективности использования моделирующего комплекса, ориентированного на выполнение, в частности, одной из самых сложных задач стыковки космических кораблей, ставится также задача применения разрабатываемого тренажера для отработки навыков стыковки МКС с грузовым транспортным кораблем "Прогресс" в телеоператорном режиме управления (ТОРУ). Этот режим выполняется экипажем станции с применением специального пульта управления, расположенного в служебном модуле МКС.

Рассмотрим, как производится проектирование тренажера на основе струк-

турных и технических решений, изложенных в предыдущих разделах монографии. Прежде всего, требуется провести анализ технических средств, с помощью которых экипаж осуществляет управление транспортным кораблем, и уточнить состав задач, которые должны быть реализованы средствами тренажера.

16.2. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ ПОЛЕТА ЭКИПАЖА ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ "СОЮЗ-ТМА"

Пилотируемый космический аппарат "Союз-ТМА" является транспортным кораблем нового поколения, который в рамках международной программы космической станции МКС используется также в качестве корабля-спасателя.

Экипаж, которому предстоит выполнить полет на транспортном корабле, должен иметь устойчивые навыки управления кораблем в штатных и аварийных ситуациях на следующих основных этапах полета.

1. Подготовка к выведению и выведение корабля на орбиту.

2. Автономный орбитальный полет и выполнение операций тестирования систем управления движением, проведение маневра (одно- или двухимпульсного) коррекции орбиты, автоматического сближения с дальности 800 км (или 80 км), ручного сближения на дальнем этапе, ручного сближения на этапе облета, зависания, причаливания и стыковки.

3. Полет в связке с МКС: проверка герметичности стыка между транспортным кораблем и МКС, консервация и расконсервация транспортного корабля, управления бортовыми системами корабля в процессе совместного полета со станцией, открытие и закрытие переходных люков, проверка их герметичности, проверка герметичности люка между бытовым отсеком и спускаемым аппаратом.



Рис. 16.1. Пульт космонавтов "Нептун-МЭ" космического корабля "Союз-ТМА"

4. Подготовка и осуществление расстыковки (штатная расстыковка с использованием БЦВК и резервная расстыковка в ручном режиме).

5. Штатная перестыковка транспортного корабля в режиме ручного управления при работе дискретного контура управления.

6. Спуск транспортного корабля с орбиты в режиме штатного автоматического управляемого спуска и различных режимах резервного и срочного спуска с дискретным и аналоговым контуром управления.

Основные операции по управлению кораблем производятся с использованием средств главного пульта космонавтов "Нептун-МЭ", который представляет собой новую систему отображения информации 5-го поколения (рис. 16.1). Это двухэкранная трехпроцессорная электронная диалоговая система отображения информации с автономными вычислительными средствами, которая интегрирует в себе элементы систем измерения, системы подачи команд (КСУ, КСП) и автономные устройства обмена информацией с ЭВМ.

С использованием средств пульта "Нептун-МЭ" реализуются задачи:

- управление бортовыми системами корабля;
- отображение пилотажно-навигационной информации;
- взаимодействие с моделью бортового управляющего вычислительного комплекса при решении задач навигации и управления движением;
- отображение главных параметров систем, запасов рабочих тел, параметров атмосферы в рабочих отсеках корабля и др.;
- формирование и выдача особо важных команд;
- выдача аварийной и предупредительной информации в световой и звуковой форме;
- отображение на телевизионном мониторе измерительной и дисплейной информации в раздельном режиме.

На главном пульте "Нептун-МЭ" расположены индивидуальные пульта управления командира ИнПУ-1 и ИнПУ-2, которые позволяют отображать информацию сигнальных табло и выдавать особо

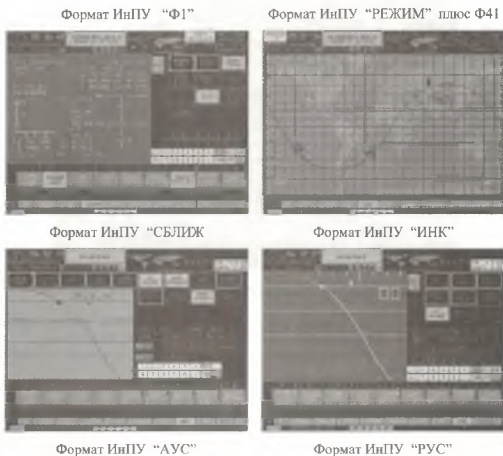


Рис. 16.2. Форматы интегрального пульта управления

важные команды (ОВК). На экранах указанных пультов отображается информация о состоянии бортовых систем, параметрах выполняемых операций, графики процессов, которыми управляет экипаж, а также измерительная и дисплейная информация, формируемая бортовым цифровым вычислительным комплексом "Аргон". На рис. 16.2 показаны некоторые основные форматы индивидуальных пультов управления командира.

При выполнении динамических операций космонавт осуществляет ручное управление транспортным кораблем на основе визуального наблюдения путем

перемещения корабля и его вращения вокруг центра масс. Для этого в спускаемом аппарате установлены следующие штатные органы управления:

- ручка управления движением (РУД) центра масс;
- ручка управления ориентацией (РУО);
- ручка управления спуском (РУС).

Ручка РУД имеет две степени свободы. Отклонение ручки по каждой из них вызывает замыкание концевых контактов, по сигналам с которых включаются двигатели ДПО для перемещения центра масс ТК в направлениях $\pm Y$ и $\pm Z$ в связанной системе координат ТК. Для вы-

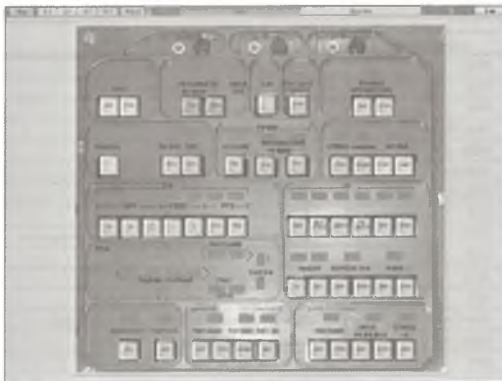


Рис. 16.7. Пульт управления БПС для режима ТОРУ ТКГ

дачи сигналов на перемещение центра масс ТК в направлении $\pm X$ на ручке предусмотрен тумблер со средним (нейтральным) положением.

Ручка РУО имеет три степени свободы (снимаемые с ручки три аналоговых сигнала соответствуют угловому перемещению корабля по курсу, по крену и по тангажу). Отклонение ручки по каждой из координат вызывает перемещение чувствительного элемента соответствующего потенциометра. Сигналы с потенциометров задают скорость разворота ТК и поступают в систему управления движением ТК.

С ручки РУС снимается 10 дискретных сигналов. На ней установлено 10 кнопок задания и управления различными режимами спуска ТК в атмосфере.

Основным визуальным прибором, который используется при выполнении

операций ручного управления транспортным кораблем, является оптический визир ВСК-4, расположенный в спускаемом аппарате. С помощью этого прибора производится наблюдение горизонта и поверхности Земли (бег Земли), МКС, контроль процесса сближения и стыковки с МКС. В зависимости от объекта наблюдения экипаж использует один из возможных режимов работы прибора: "визир-ориент" (направлен по оси $-Y$ ТК) и "визир-причал" (направлен по оси $-X$ ТК). На рис. 16.3 и рис. 16.4 (см. цветную вкладку) показан вариант визуальной обстановки, отображаемой в приборе ВСК-4 в этих режимах.

При выполнении стыковки экипажем МКС в режиме ТОРУ для визуального наблюдения за целью и контроля процесса

16.1. Приборы ручного управления в кабинах спускаемого аппарата и бытового отсека на транспортном корабле "Союз-ТМА"

Приборы и органы ручного управления ТК	Наименование прибора
РУО	Ручка управления ориентацией
РУД	Ручка управления движением
РУС	Ручка управления спуском
ЭПК-ПСА	Электропневмоклапан
РПВ-1,2	Регулятор подачи воздуха
ЭПК-РД	Электропневмоклапан
ЭПК-П	
КРЗ	Кран распределительный
БРУС	Блок ручного управления спускаемым аппаратом
ЗДВ	
ДСД	Датчик – сигнализатор давления
КР2	Кран распределительный
Люк СА-БО	Люк спускаемого аппарата – бытового отсека
КВД СА-БО	Клапан выравнивания давления СА-БО
БР1	
РАП-10	Ручной антенный переключатель
РАП-7	Ручной антенный переключатель
КСД - БО	Клапан стравливания давления из бытового отсека
СКГС	Система контроля герметичности стыка
БРУБ	Блок ручного управления бытовым отсеком
МАНОВАКУУМЕТР	
КР1	Кран распределительный
БАПД	Блок автоматики переключения двигателей
Заглушка КСД-СУ	Заглушка клапана стравливания давления из стыковочного узла

сближения и стыковки с МКС использует видеоконтрольное устройство-дисплей ТОРУ, на которое поступает изображение с внешней телекамеры.

Внешняя телекамера и дисплей ТОРУ позволяют производить наблюдение внешней визуальной обстановки при двух фиксированных углах поля зрения: узкий угол $13^{\circ}50' \times 10^{\circ}20'$ и широкий угол $64^{\circ} \times 50^{\circ}$ (рис. 16.5, 16.6, см. цветную вкладку).

Для выполнения стыковки экипажем МКС в режиме ТОРУ в служебном модуле МКС установлена аппаратура, в составе которой для ручного управления используется пульт управления блока преобразования сигналов (БПС). Пульт управления БПС (рис. 16.7) предназначен для выдачи команд управления, связанных с организацией режима ТОРУ и контроля квитанций о прохождении вы-

данных команд и сигналов РУО и РУД со спускаемого модуля на ТКГ.

Кроме указанных средств управления транспортным кораблем в кабинах спускаемого аппарата и бытового отсека расположены другие приборы управления бортовыми системами и узлами космического аппарата. Основные средства ручного управления и контроля представлены в табл. 16.1.

При создании тренажера транспортного корабля, как следует из гл. 1, необходимо решить две задачи:

- воспроизвести условия работы экипажа при управлении транспортным кораблем, т.е. смоделировать среду, в которой работает экипаж, работу бортовых систем и динамику движения космического аппарата, а также процессы, которыми управляет экипаж;

- создать средства управления процессом проведения тренировки и оценки ее результатов.

16.3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ "СОЮЗ-ТМА"

В основу построения изделия может быть положена типовая структура тренажера, описанная в п. 5.1.

Принципиальной особенностью мобильного и бортового варианта построения тренажера является физическое отсутствие в его составе рабочего места оператора – специально оборудованного макета или рабочей зоны штатного корабля. Такое решение принимается с учетом требований к максимальной простоте и минимальным габаритам тренажера. В бортовом тренажере можно было бы рассматривать возможность использования при тренировке бортового оборудования транспортного корабля. Однако система управления бортовым комплексом должна в любой момент времени обеспечивать текущие задачи полета, и использование даже части ее ресурсов во время трени-

ровки, либо проведение перекоммутации необходимого для проведения тренировки оборудования может привести к снижению безопасности полета.

Такое решение целесообразно только в том случае, когда режим тренировки на борту в процессе функционирования реального изделия предусматривается еще на этапе проектирования штатного объекта. Поэтому при построении тренажера принято решение о воспроизведении элементов внутреннего интерфейса и внешней среды компьютерными средствами путем геометрического моделирования всех видимых объектов.

В целях сохранения моторных навыков при выполнении динамических операций управления движением корабля в состав тренажера включается минимальный набор самых необходимых органов управления: ручка управления движением центра масс (РУД), ручка управления ориентацией (РУО) и ручка управления спуском (РУС).

Так как при самостоятельной подготовке и при работе на борту корабля тренировки должны проводиться без присутствия инструкторов, в состав тренажера не включается пульт инструктора. В то же время в его составе должны быть предусмотрены программные средства для задания начальных условий и управления тренировкой.

Для всех вариантов создаваемого тренажера (стационарный, мобильный и бортовой) принимаются однотипные решения, ориентированные на использование одних и тех же технических и программных средств.

Основными техническими компонентами тренажера являются компьютерная система и внешний блок ручного управления, который конструктивно объединяет ручки РУО, РУД, РУС и блок аналого-цифрового преобразования (АЦП) для подключения их к компьютеру.

В качестве средств вычислительной техники используются ноутбуки достаточ-

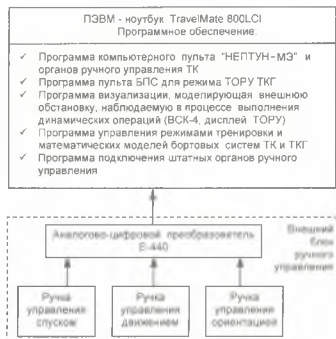


Рис. 16.8. Структурная схема бортового (мобильного) тренажера (одномашинный вариант)

но высокой производительности (типа TravelMate 800LCI), при использовании которых достигается загрузка процессора 80...90 %.

Ручки РУД, РУО, РУС подключаются через внешний аналого-цифровой преобразователь (плата E-440) к USB-порту ноутбука (или стационарной ПЭВМ).

Так как варианты построения тренажера отличаются объемом реализуемых на их основе задач, то для бортового, мобильного и стационарного вариантов принимается соответственно одно-, двух- и трехмашинная вычислительная система.

Для построения бортового тренажера рекомендуется одномашинный вариант, представленный на рис. 16.8. На рисунке указан также состав основных программных модулей, реализующих на базе компьютера задачи полета корабля в связ-

ке с МКС, расстыковки, перестыковки и спуска с орбиты. Питание всей аппаратуры тренажера осуществляется от внутреннего источника питания ноутбука.

Мобильный вариант тренажера, рекомендуемый для использования при предстартовой подготовке экипажей космонавтов на космодроме или поддержания навыков космонавтов в длительной командировке, строится на базе двух компьютеров (рис. 16.9). В этом варианте средствами моделирующего комплекса решаются дополнительно задачи выведения и автономного орбитального полета ТК.

В стационарном варианте исполнения тренажера, который предназначен для использования на базе РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина при плановой или самостоятельной подготовке космонавтов, в состав изделия можно включить четыре

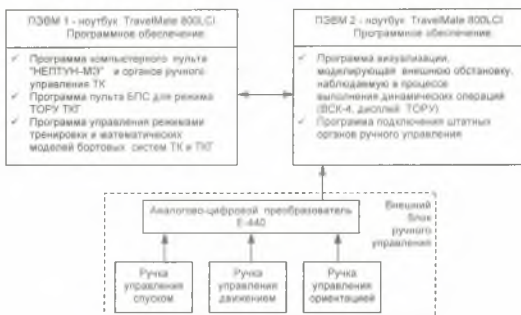


Рис. 16.9. Структурная схема бортового (мобильного) тренажера (двухмашинный вариант) транспортного космического корабля



Рис. 16.10. Многофункциональный бортовой компьютерный тренажер транспортного космического корабля "Союз-ТМА"

стационарных ПЭВМ (каждая из них содержит процессорный блок AMD Athlon XP1600, монитор, клавиатура, мышь) и внешний блок ручного управления (с ручками РУО, РУД, РУС и блоком АЦП Е-440). Программные средства тренажера рекомендуются распределять по узлам вычислительной сети следующим образом:

- ПЭВМ № 1 – программа компьютерного макета пульта "НЕПТУН-МЭ" (ИИПУ-1) и приборов ручного управления ТК;

- ПЭВМ № 2 – программа визуализации (прибор ВСК-4, дисплей ТОРУ);

- ПЭВМ № 3 – программа компьютерного макета пульта "НЕПТУН-МЭ" (ИИПУ-2) и приборов ручного управления ТК, программа пульта БПС для режима ТОРУ ТКГ, программа подключения штатных органов ручного управления (РУО, РУД, РУС);

- ПЭВМ № 4 – программа управления режимами тренировки и математических моделей бортовых систем ТК и ТКГ.

Все варианты тренажера обладают одинаковым интерфейсом обучаемого (одинаковыми виртуальными форматами пультов, приборов ТК и ТКГ), а также одинаковыми служебными форматами (ввод состояний, начальных условий сближения, отказов и т.д.).

Очевидным достоинством принятых решений являются легкость и удобство переноски и перевозки, возможность широкого маневра в выборе места установки и использования тренажера, в том числе и при использовании его на борту МКС.

Средства бортового тренажера являются функционально завершенными и полностью автономными; они не зависят от дополнительной аппаратуры или источников питания и не требуют взаимодействия с бортовой аппаратурой МКС. Масса тренажера не превышает 5 ... 7 кг (он зависит от массы используемого ноутбука).

Внешний вид тренажера приведен на рис. 16.10.

16.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА

В соответствии с составом функциональных систем тренажера (см. п. 4.1) и с учетом необходимости компьютерного моделирования приборного оборудования и внешней визуальной обстановки в состав программного обеспечения создаваемого тренажера следует включить следующие программные компоненты:

- программы моделирования динамики движения и бортовых систем транспортного корабля;

- программы визуализации, которые обеспечивают моделирование внешней обстановки, наблюдаемой в процессе выполнения динамических операций (ВСК-4, дисплей ТОРУ);

- программы управления режимами тренировки и математических моделей бортовых систем ТК и ТКГ;

- программы моделирования компьютерного пульта "НЕПТУН-МЭ" и органов ручного управления ТК;

- программы моделирования пульта БПС для режима ТОРУ ТКГ;

- программы подключения и обработки сигналов со штатных органов ручного управления.

Основой всех вычислительных процессов моделирования управляемых объектов являются математические модели бортовых систем ТК и ТКГ. Их главная задача – расчет параметров движения и состояния бортовых систем транспортного корабля, которые используются в форматах компьютерного макета пульта "НЕПТУН-МЭ" и в программах визуализации, чтобы предоставить возможность обучаемому работать с оборудованием корабля так же, как и в условиях космического полета.

16.2. Состав бортовых систем, вычислителей, датчиков и приборов, моделируемых средствами тренажера

Бортовая система (прибор, процесс)	Наименование
СУБК	Система управления бортовым комплексом
СУД	Система управления движением
БЦВК "Аргон-16"	Бортовой цифровой вычислительный комплекс
КС-020 М	Бортовой спецвычислитель спуска
ИКВ	Инфракрасная курсоверткаль
ДУС	Датчик угловой скорости
АКС	
СД	Солнечный датчик
СУС	Система управления спуском
БРВИ	Блок ручного ввода информации
БФИ	Блок формирования изображения
БУПО	Блок управления перемещением и ориентации
"КУРС"	Радиотехническая система сближения
КДУ	Комбинированная двигательная установка
СЭП	Система электропитания
СТР	Система терморегулирования
СОЖ	Система обеспечения жизнедеятельности
СКГС	Система контроля герметичного стыка
ССВП	Система стыковки и внутреннего перехода
САС	Система аварийного спасения
СРР и СД	
КСС	Комплекс средств спасения
СИОС	Система исполнительных органов спуска
СП	
ИнПУ 1/2	Интегрированный пульт управления
КЛ-110	
Динамика процесса выведения ТК	
Динамика взаимного движения ТК и МКС, их ориентации и сближения	
Динамика процесса спуска ТК с орбиты	Штатная бортовая модель спуска

Реакция на управляющие воздействия оператора моделей имитации логики работы реальных бортовых систем должна быть практически идентичной отклику

систем и компонентов реального объекта.

Модели движения рассчитывают движение активного (ТК или ТКГ) и пассивного (МКС) объектов в соответствии с

начальными условиями, заданными инструктором в начале режима, и последующими управляющими воздействиями оператора на штатные органы ручного управления. Затем параметры орбитального движения выдаются в программу визуализации для расчета положения объектов, воспроизводимых системой имитации визуальной обстановки в средствах наблюдения.

Можно выделить три основные группы математических моделей тренажера:

- модели имитации логики работы реальных бортовых систем ТК и ТКГ;
- модели, предназначенные для расчетов параметров внутренней и внешней среды (параметров орбитального движения, внутренней атмосферы отсеков и др.);
- модели для выполнения специфических учебных задач, таких как имитация отказов оборудования, оценка действий обучаемого и т.д.

Совокупность всех этих моделей образует основной программный комплекс, который работает в реальном времени и обеспечивает расчетными параметрами все форматы обучаемого.

Исходя из определенного для тренажера объема задач подготовки экипажа при моделировании бортовых систем транспортного корабля разрабатываются программные модули тех систем, управление которыми осуществляет оператор.

Состав реализованных в моделирующем комплексе мобильного тренажера бортовых систем приведен в табл. 16.2.

С учетом особой важности отработки на тренажерах нештатных и аварийных ситуаций в моделях имитируемых процессов и бортовых систем предусматривается 97 нештатных ситуаций, в том числе, реализуется 48 отказов, вводимых на этапе автоматического и ручного сближения, облета, причаливания, стыковки, расстыковки и перестыковки ТК с МКС, и 49 отказов, вводимых на этапе спуска.

Следует отметить, что в комплексных тренажерах в контуре моделирования объекта, как правило, используются штатные бортовые вычислительные комплексы. В мобильном (компьютерном) тренажере использование такого дорогостоящего оборудования обычно не оправдывается. Поэтому для создаваемого бортового тренажера транспортного корабля разработаны модели БЦВК "Аргон-16" и спецвычислителя КС020, которые реализуют функции данных устройств в объеме, обеспечивающем обрабатываемые на тренажере штатные режимы работы и предусмотренные отказы.

Для обеспечения моделирования режима ТОРУ ТКГ в составе моделирующего комплекса были разработаны модели аппаратуры ТОРУ, установленного на борту служебного модуля и ТКГ. В динамических моделях взаимного движения ТКГ и МКС по орбите Земли, их ориентации и сближения учтены особенности системы управления и КДУ ТКГ. Для того, чтобы адекватно реализовывать особенности ручного управления в данном режиме, в модели введены временные задержки, связанные с передачей управляющих воздействий с борта МКС на борт ТКГ.

Система имитации визуальной обстановки в средствах наблюдения позволяет моделировать внешнюю визуальную картину, наблюдаемую в процессе выполнения динамических операций через прибор ВСК-4 или внешнюю телевизионную камеру для режима ТОРУ ТКГ. Программа визуализации отображает на мониторе маску средства визуального наблюдения и, в зависимости от выбранного режима, либо пассивный объект (МКС в заданной конфигурации), либо подстилающую поверхность Земли, наблюдаемую через прибор (см. рис. 16.3, 16.4).

Модель визира ВСК-4 позволяет имитировать внешнюю визуальную обстановку, наблюдаемую через прибор как на солнечной, так и на теневой части орбиты (при включенной фаре).

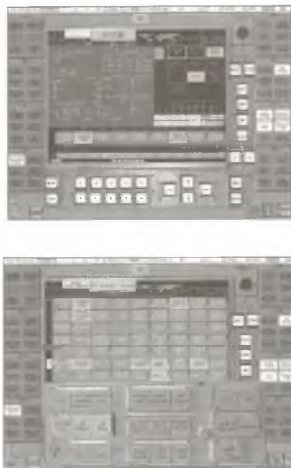


Рис. 16.11. Виртуальные форматы ПК "НЕПТУН-МЭ" в одномашинном варианте тренажера (ИНПУ-2)

Модель внешней телекамеры и дисплея ТОРУ позволяет осуществлять наблюдение экипажем объекта стыковки в зависимости от выбранного им угла поля зрения (см. рис. 16.5, 16.6).

С использованием методов геометрического моделирования (так же, как в компьютерных тренажерах на основе применения технологий виртуальной реальности, см. гл. 14), на экране монитора формируется изображение всех пультов управления, с которыми работает экипаж в полете. Компьютерная модель главного пульта космонавтов "НЕПТУН-МЭ" реа-

лизуется на одной рабочей станции (ноутбуке).

Этот вариант компьютерного макета главного пульта космонавтов "НЕПТУН-МЭ" представлен на рис. 16.11. На компьютерном макете индивидуального пульта управления командира (ИНПУ-2) отображается информация сигнальных табло (ТС1–ТС8) и обеспечивается возможность ввода особо важных команд (ОВК).

В стационарном варианте тренажера компьютерный макет пульта "НЕПТУН-МЭ" размещается на двух рабочих станциях. Модель индивидуального пульта уп-

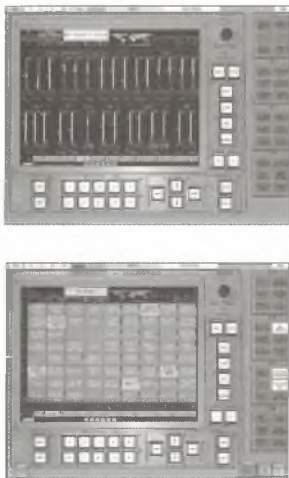


Рис. 16.12. Виртуальные форматы ПК "НЕПТУН-МЭ" в многомашинном варианте тренажера (ИнПУ)

равления ИнПУ-1 главного пульта космонавтов "НЕПТУН-МЭ" позволяет отображать информацию сигнальных табло (ТС1–ТС4) и выдавать особо важные команды (ОВК) главного пульта космонавтов ТК (рис. 16.12).

Модель ИнПУ-2 (см. рис. 16.12) позволяет отображать информацию, выводимую в полете на штатный индивидуальный пульт управления ИнПУ-2, а также отображать информацию сигнальных табло (ТС7–ТС8) главного пульта космонавтов ТК. Кроме этого, в тре-

нажере смоделированы все форматы ИнПУ, требуемые для обеспечения подготовки космонавтов в отработываемых режимах, а также штатная телевизионная врезка, совмещенная с форматами ИнПУ. Телевизионная врезка обеспечивает отображение измерительной и дисплейной информации в раздельном режиме (форматы БЦВК "Аргон") и отображение кривой спуска в режиме РУС, формируемое прибором КЛ-110.

Интерфейс форматов компьютерного макета главного пульта космонавтов



Рис. 16.13. Приборное оборудование кабины спускаемого аппарата и бытового отсека

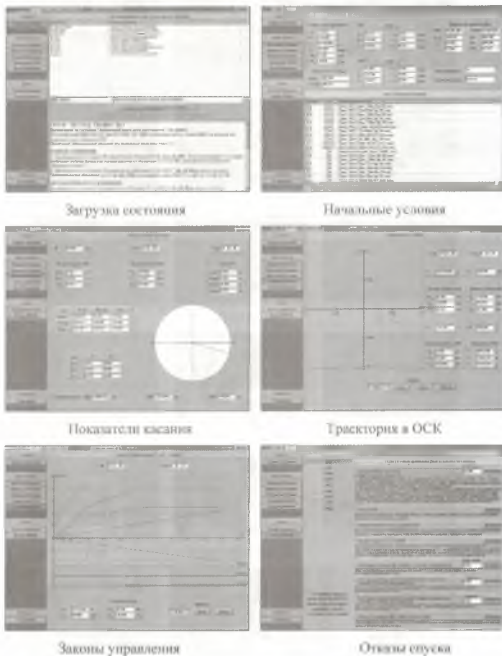


Рис. 16.14. Примеры служебных форматов управления тренировкой

"НЕПТУН-МЭ" позволяет решать задачи обучения и воздействовать на органы управления практически так же, как и в процессе работы с реальным главным пультом космонавтов "НЕПТУН-МЭ".

В мобильном тренажере средствами машинной графики реализован также весь требуемый набор приборов ручного управления ТК, определяемый составом решаемых задач подготовки. Кроме трех реальных (штатных) приборов ручного управления (ручек РУО, РУД, РУС) все остальные приборы представлены в виде виртуальных моделей (рис. 16.13).

Управление на отдельном формате прибора или клапана осуществляется посредством нажатия мышкой на "чувствительные рабочие зоны" прибора или клапана. Признаком установки курсора в "чувствительную рабочую зону" прибора или клапана является изменение внешнего вида курсора (курсор из "стрелки" превращается в "палец").

Программа управления режимами тренировки позволяет управлять работой тренажера посредством выбора начальных состояний тренировочного процесса, ввода начальных условий ручного сближения, ввода отказов в моделируемый процесс и контроля за ходом тренировочного процесса на специализированных служебных форматах (рис. 16.14).

Во всех конфигурациях тренажера программа управления режимами тренировки обеспечивает возможность:

- запускать, останавливать тренировку (процесс моделирования);
- менять масштаб моделирования по отношению к реальному времени, например 2:1, 4:1, 10:1;
- хранить на жестком диске базу состояний процессов моделирования (срезы состояний моделей) и восстанавливать их в качестве начальных условий;
- вводить заранее подготовленные варианты начальных условий ручного сближения из базы данных;

– вводить отказы в моделируемый процесс;

– визуально контролировать на мониторе параметры моделирования, используя служебные форматы в виде таблиц, графиков;

– управлять распределенным вычислительным процессом моделирования.

Таким образом, программа управления режимами тренировки и математических моделей бортовых систем ТК и ТКГ позволяет управлять работой тренажера посредством выбора начальных состояний тренировочного процесса, ввода начальных условий ручного сближения, ввода отказов в моделируемый процесс и контроля за ходом тренировочного процесса на специализированных служебных форматах. Программный комплекс моделей бортовых систем ТК и ТКГ обеспечивает требуемыми данными и принимает команды от форматов компьютерного макета пульта "НЕПТУН-МЭ", приборов кабин СА и БО, форматов программы визуализации, предоставляя возможность обучаемому работать с ними в условиях близких к условиям космического полета.

Программа подключения штатных органов ручного управления: РУО, РУД, РУС обеспечивает прием сигналов, поступающих через АЦП, их дешифрирование и масштабирование, передачу обработанных сигналов в модели бортовых систем ТК и ТКГ.

Все вышеперечисленные компоненты ПО БМТ являются автономными функционально достаточными блоками, которые запускаются и выполняются как отдельные задачи в среде Windows XP.

Для обеспечения организации вычислительного процесса и выполнения с заданными временными ограничениями всего комплекса прикладных программ, а также обмена данными между ними используется специализированная тренажная оболочка тренажера. В состав тренажной оболочки входят следующие

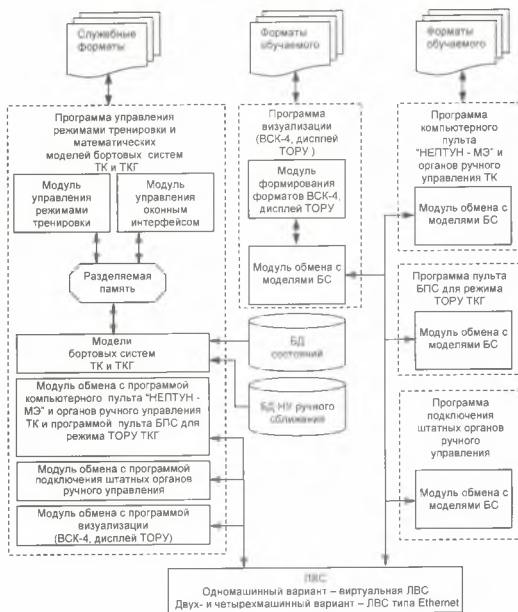


Рис. 16.15. Программное обеспечение тренажера

модули программы управления режимами тренировки и математических моделей бортовых систем ТК и ТКГ (рис. 16.15):

- управления режимами тренировки;

- управления оконным интерфейсом;
- обмена с программой компьютерного пульта "НЕПТУН-МЭ" и органов ручного управления ТК и программой

пульта БПС для режима ТОРУ ТКГ;

- обмена с программой подключения штатных органов ручного управления;
- обмена с программой визуализации (ВСК-4, дисплей ТОРУ).

Кроме этого, в состав тренажной обложки входят четыре модуля обмена с моделями бортовых систем. Эти модули физически включены в состав программ компьютерного пульта "НЕПТУН-МЭ" и органов ручного управления ТК, программы пульта БПС для режима ТОРУ ТКГ, программы визуализации и программы подключения штатных органов ручного управления.

Модуль управления режимами тренировки обеспечивает выбор начальных состояний тренировочного процесса из БД состояний, ввод начальных условий ручного сближения из БД начальных условий ручного сближения, ввод отказов в моделируемый процесс и контроль хода тренировочного процесса на специализированных служебных форматах.

Семь модулей обмена данными образуют четыре основных канала межпрограммного обмена между следующими компонентами:

- модели бортовых систем ТК и ТКГ – программа компьютерного пульта "НЕПТУН-МЭ" и органов ручного управления ТК;
- модели бортовых систем ТК и ТКГ – программа пульта БПС для режима ТОРУ ТКГ;
- модели бортовых систем ТК и ТКГ – программа визуализации;
- модели бортовых систем ТК и ТКГ – программа подключения штатных органов ручного управления.

Все каналы межпрограммного обмена имеют свой протокол обмена данными, отличающийся структурой передаваемых данных и объемом передаваемых параметров (всего двадцать параметров для протокола обмена с программой подключения штатных органов

ручного управления и несколько сотен параметров для протокола обмена с программой компьютерного пульта "НЕПТУН-МЭ" и органов ручного управления ТК).

Для того, чтобы исключить рывки изображения на форматах программы визуализации, коллизии между конкурирующими задачами, нежелательные перекрытия окон при активизации задач и потери при вводе данных от клавиатуры для задач, находящихся в фоновом режиме, в состав тренажной обложки включен модуль управления оконным интерфейсом. Данный модуль, введенный в состав программы управления режимами тренировки и моделей бортовых систем ТК и ТКГ, запускается с правами "суперзадачи" по отношению к выполняемым задачам всех других компонентов программного обеспечения тренажера.

Модуль управления оконным интерфейсом управляет приоритетом выполнения всех других задач. Приоритет задач устанавливается в зависимости от типа решаемой в данный момент задачи подготовки и активности форматов, формируемых при работе данной программы.

Модуль управления оконным интерфейсом хранит также информацию обо всех основных окнах форматов других выполняемых задач. Эта информация позволяет менять местоположение окон форматов других задач, устанавливать глубину (порядок) перекрытия окна формата другими окнами форматов, сворачивать и восстанавливать окно формата, устанавливать разрешение экрана дисплея, необходимое для текущего формата.

Кроме этого, модуль управления оконным интерфейсом имеет доступ к базе данных, в которой хранятся типовые варианты местоположения и взаимного перекрытия окон форматов для типовых режимов подготовки. Для предотвращения нежелательного взаимного перекрытия форматов после каждого нажатия

на клавишу мыши (например, при выдаче команды с КСП) модуль управления оконным интерфейсом обращается в свою базу и выбирает из нее тот набор форматов и их взаимное расположение, которое соответствует характеру текущей работы на тренажере. После этого модуль управления оконным интерфейсом восстанавливает исходное расположение всех окон и порядок их взаимного перекрытия.

Принятые при построении тренажера технические решения позволили в полной мере реализовать задачи отработки навыков выполнения основных операций по управлению транспортным кораблем "Союз ТМА" на соответствующих этапах полета и обеспечить возможность оперативного изменения в последующем состава программных модулей и аппаратных средств.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ СОЗДАНИИ СРЕДСТВ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

17. КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ И ТРЕНИРОВКИ ЛЕТЧИКОВ ВЕРТОЛЕТА КА-50

В отличие от космонавтики, где тренажеры фактически являются единственным средством практической подготовки операторов к выполнению своей профессиональной деятельности, подготовка летчиков традиционно проводилась с использованием реальной летной техники и реальных учебных полетов. Однако в современных условиях от этой практики приходится отказываться. Решающим здесь является экономический фактор, экономия материальных средств и технического ресурса авиационной техники, особенно военной. Например, стоимость одного выстрела противотанковой управляемой ракетой (на вертолете Ка-50 устанавливается до 12 таких ракет), без учета затрат на топливо и эксплуатацию учебного вертолета, составляет более 300 тыс. руб. Современные затраты на боевую подготовку летчиков таковы, что нет альтернативы переносу основной части их практической учебной работы на тренажеры.

Комплекс средств обучения и тренировки летчиков вертолета Ка-50 (комплексный тренажер "Краб") был разработан Центром тренажеростроения и подготовки персонала по заданию ОАО "Камоу". Он предназначен для поддержания навыков летного состава по выполнению пилотажно-навигационных задач, формирования, поддержания, совершенствования знаний и навыков, необходимых для боевого применения авиационных средств поражения вертолета Ка-50.

К многофункциональным задачам подготовки летчиков, для решения которых предназначен комплексный тренажер "Краб", относятся:

- отработка действий летчика после посадки в кабину по включению и подготовке оборудования вертолета;

- выполнение полета, включая взлет, набор высоты, горизонтальный полет в установившемся и переходных режимах, висение, снижение и посадку;

- полет в режимах "Боевой навигации", в том числе выполнение режимов "Висение", "Висение в засаде", "Развороты на висении", "Перемещение вперед-назад", "Смещение влево-вправо", "Взлет по-вертолетному с использованием влияния воздушной подушки", "Взлет из засады", "Подскок";

- поиск цели и предварительное наведение вертолета на цель с использованием прицельного комплекса "Шквал-В" в режимах автоматического сканирования, ручного целеуказания, захвата цели и ее автоматического сопровождения;

- прицеливание и применение авиационных средств поражения, в том числе вертолетной пушечной установки, неуправляемых авиационных ракет (НАР) и противотанковых управляемых ракет (ПТУР).

Кроме того, тренажер обеспечивает инструктору решение учебно-методических задач: контроль действий летчика, ввод начальных условий, задание нештатных ситуаций, управление тактической обстановкой района действий, а также "подыгрыш" некоторых действий летчика с пульта контроля и управления.



Рис. 17.1. Структура комплексного тренажера "Краб" вертолета КА-50

Опытный образец тренажера создавался в короткие сроки (2001 – 2002 гг.), поэтому залогом успешного выполнения работы было широкое применение методов, технологий и готовых решений, наработанных при создании тренажерных комплексов для подготовки космонавтов.

Структура комплексного тренажера "Краб" вертолета Ка-50 показана на рис. 17.1. Она в целом соответствует типовой модульной адаптивной структуре абстрактного тренажера, рассмотренной в гл. 2.

В состав тренажера входят следующие системы:

- вычислительная система (ВС);
- рабочее место летчика (РМЛ);
- система имитации органов управления вертолетом (СИОУ);
- устройства сопряжения с объектом (УСО);
- система математического моделирования объекта;
- система имитации тактической обстановки (СИТО);

- система управления тренировкой (СУТ);
- система имитации визуальной обстановки (СИВО);
- система имитации акустических шумов (СИАШ);
- система имитации радиосвязи (СИРС);
- система электропитания (СЭП).

Целый ряд систем комплексного тренажера "Краб" был построен из модулей, спроектированных и отлаженных при разработке технических средств подготовки космонавтов. Так, в качестве общего математического обеспечения ВС, построенной на базе пяти ПЭВМ и промышленного компьютера с процессорной платой Peak 635VL-100, использовано адаптированное ОМО тренажерного комплекса РС МКС. СУТ с пультами контроля и управления, СЭП, УСО также были изготовлены из типовых модулей, ранее примененных в космических тренажерных комплексах.

Рабочее место летчика комплексного тренажера реализовано на базе кабины



Рис. 17.2. Рабочее место летчика комплексного тренажера "Краб"

вертолета Ка-50, установленной на специальной подставке (рис. 17.2).

Интерьер кабины максимально соответствует штатному. В РМЛ обеспечено функционирование следующего оборудования:

- основные органы управления вертолетом (ручка продольно-поперечного управления РППУ, рычаг общего шага РОШ и педали путевого управления ППУ);
- левая приборная доска (рис. 17.3, см. цветную вставку), включающая в себя имитатор акселерометра АДП-4, имитатор вариометра ВР-30ПВ, тахометр ИТЭ-1Т, имитатор указателя скорости УС-350, индикатор командно-пилотажный ИКП-81, имитатор высотомера ВМ-15ПВ, радиовысотомер А-034-4-8, прибор навигационно-плановый ПНП-72, имитатор индикатора общего шага ИП-21-15;
- интегральные средства отображения информации (имитатор индикатора на лобовом стекле ИЛС-31, синтезируемый системой имитации внекабинной визуальной обстановки на экране для

лобового остекления, и имитатор телевизионного индикатора ТВ-109М);

- штатное кресло летчика К-37-800 с регулированием высоты;
- панель "Радио" связного оборудования на пульте левом;
- пульт выбора режимов ПВР-800 прицельно-пилотажно-навигационного комплекса ПрПНК "Рубикон" на пульте левом;
- пульт индикации ПИ-800 и пульт включения ПВ-800 системы управления оружием СУО-800 на центральном пульте;
- пульт пилотажных режимов ППР-800А пилотажно-навигационного комплекса ПНК "Радикан" на правом пульте;
- отдельные переключатели ("= ТОК АКК", "ГЕН. ЛЕВ. ~ ТОК", "ГЕН. ПРАВ. ~ ТОК") на панели "Энергетика" пульта правого бокового;
- отдельные переключатели ("АВСК", "УКВ", "ТЛК") на панели "Радиоборудование" пульта правого бокового;
- переключатели "ОБОГР. ИКВ", "ИКВ" и органы управления подсветом



Рис. 17.4. Механизм загрузки органов управления тренажера "Краб"

приборов и пультов панели "Регулировка яркости подсвета" на пульте контроля.

Для формирования на тренажере верных навыков управления вертолетом важно, чтобы усилия, ощущаемые обучаемым при работе с органами управления, были адекватны штатным. Для решения этой задачи специально для тренажера "Краб" была разработана оригинальная система имитации органов управления, обеспечивающая загрузку основных органов управления вертолета: РППУ, РОШ и ППУ.

СИОУ обеспечивает имитацию загрузки органов управления тренажера при отключенной штатной гидросистеме. Для этого в конструкцию тренажера введены гидродемпферы, установленные вместо демонтированных штатных тяг в разрыве между гермоузлом и штатной рулевой системой РС-80. При этом, для блокировки ходов гидроцилиндров выше перечисленных органов управления на РС-80 установлены ограничители, стопорящие гидроцилиндры в нейтральном положении органов управления.

Конструкция демпфирующих устройств позволяет производить перемещения органов управления в заданных пределах и с заданными усилиями, не передавая движение далее к гидроцилиндрам. Регулировка ходов поршней гидродемпферов, а, соответственно, и самих ручек РППУ тангаж, крен, ППУ и РОШ, осуществляется установкой втулок расчетной длины под поршень (при ходе вперед) и над поршнем (при ходе назад) в соответствующем гидродемпфере. Регулирование усилий перемещения поршней гидродемпферов, а соответственно органов управления, осуществляется пружинами, рассчитанными в соответствии со штатными усилиями и устанавливаемыми под поршень (при ходе вперед) и над поршнем (при ходе назад).

Все элементы механизма загрузки собраны на специальной раме, которая закреплена на задней стенке макета кабины снаружи (рис. 17.4).

Основными частями системы математического моделирования объекта являются модель динамики полета вертолета и модель прицельного комплекса.

Модель прицельного комплекса обеспечивает:

- обнаружение цели на индикаторе телевизионном (ИТ), автоматическое, программное или ручное сопровождение ее при прицеливании по наземным подвижным и неподвижным целям, в том числе, малоразмерным типа "танк";
- наведение ПТУР "Вихрь" на подвижную и неподвижную цель;
- прицельную стрельбу из пушки в подвижном и неподвижном режимах ее применения;
- прицеливание и пуск НАР;
- измерение дальности, курсового угла и угла места цели (ориентира);
- определение координат места положения цели и точки подхода к цели;
- формирование и выдачу в вычислительные средства ПриНК информации об угловых координатах цели (ориентира) и измеряемой дальности до нее для воспроизведения на ИТ информации, обеспечивающей решение задач автоматизированного прицеливания при боевом применении всех видов оружия;
- воспроизведение на экране ИТ изображения местности (целей) в укрупненном масштабе с шести- или двадцатидвухкратным увеличением с наложением на него прицельной информации.

Модель динамики полета вертолета, разработанная специалистами ОАО "Камов", выполняет следующие функции:

- отработка введенных инструктором начальных условий полета;
- расчет параметров полета вертолета с учетом управления от РМЛ;
- расчет модели автопилота;
- расчет параметров положения вертолета в виртуальном пространстве для системы имитации визуальной обстановки;
- расчет параметров, необходимых для моделирования других систем вертолета;
- расчет параметров для вывода на приборы РМЛ.

Модель динамики вертолета, в частности, учитывает такие явления, как изменение аэродинамических параметров в зависимости от скорости полета и возникновение воздушной подушки при полете в непосредственной близости земли. Такт моделирования динамики вертолета составляет 20 мс.

Система имитации тактической обстановки (СИТО) предназначена для имитации тактической обстановки при работе с бортовым радиоэлектронным комплексом в части поиска цели, прицеливания и применения всех штатных видов средств поражения.

СИТО комплексного тренажера "Краб" обеспечивает выполнение следующих функций:

- моделирование перемещения наземной техники по заданным маршрутам, с заданной скоростью и со случайным выбором продолжения маршрута;
- моделирование ориентации движущейся наземной техники на поверхности, задаваемой сеткой высот;
- торможение движущегося наземного объекта при наличии помех от других движущихся объектов;
- съезд движущегося наземного объекта с маршрута при поражении его снарядом;
- ведение базы состояния объектов СИТО (скорость, позиция и ориентация наземной техники, степень поражения объектов);
- обработка информации о пораженных целях, формирование информации и типов спецэффектов для СИТО;
- формирование и управление отображением информации СИТО на формате инструктора (рис. 17.5).

Система имитации радиосвязи тренажера "Краб" обеспечивает имитацию радиосвязи между обучаемым летчиком в РМЛ и инструктором, находящимся за ПКУ системы управления тренировкой, по проводным каналам связи. СИРС выполнена без использования штатного



Рис. 17.5. Информационный и управляющий формат системы имитации тактической обстановки в тренажере "Краб"

оборудования вертолета, что имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам относится невысокая стоимость примененных технических устройств связи, их простота в обслуживании и в ремонте. Недостатком является то, что остаются незадействованными штатные органы управления радиосвязью вертолета.

В состав СИРС входит двухканальный усилитель оригинальной разработки и две микрофонные гарнитуры ГСШ-А-18, подключаемые к усилителю с помощью удлинительных кабелей. Одна микрофонная гарнитура предназначена для пилота, а другая – для инструктора. Предусмотрена возможность подключения вместо микрофонной гарнитуры инструктора блока громкоговорящей связи с регулятором громкости на

лицевой панели. Микрофонная гарнитура инструктора в этом случае подключается к блоку громкоговорящей связи.

Система имитации акустических шумов тренажера "Краб" предназначена для формирования и предъявления обучаемому шумов от акустических источников реального вертолета (силовой установки, несущих винтов, авиационных средств поражения).

СИАС представляет собой программно-аппаратный комплекс. Программная часть СИАС построена на основе компонента DirectMusic пакета Direct X. Разработанные оригинальные программы позволяют загружать, воспроизводить и микшировать файлы звуковой обстановки, а также применять к ним различные звуковые спецэффекты, такие как эхо, реверберация и др.

Аппаратная часть СИАШ включает в себя:

- сабвуфер ACS-48, высокочастотный усилитель и высокочастотный динамик ACS-48-A, расположенные в макете кабины;
- низкочастотный усилитель, расположенный в стойке вычислительной системы.
- СИАШ комплексного тренажера "Краб" обеспечивает воспроизведение:
 - шумов двигателя в процессе полета;
 - звуковых эффектов спуска ракет ПТУР;
 - звуковых эффектов спуска ракет НАР;
 - звуковых эффектов стрельбы из пушки.

Система имитации визуальной обстановки тренажера "Краб" обеспечивает формирование и предъявление внешней визуальной обстановки на лобовое, правое боковое, левое боковое остекление и в канале индикатора телевизионного. Кроме того, СИВО обеспечивает инструктору возможность наблюдения внекабинной визуальной обстановки на мониторах ПКУ.

Формирование визуальной обстановки обеспечивается трехмерным программным моделированием района полетов в соответствии с полетной картой. Эта задача возложена на четыре ПЭВМ из состава ВС (по одной ПЭВМ на каждый канал: лобовой, левый, правый и индикатора телевизионного). Загрузка, визуализация, управление и изменение атрибутов трехмерных объектов обеспечивается оригинальным графическим движком, построенным на основе компонента Direct3D Immediate Mode пакета Direct X.

СИВО тренажера "Краб" обеспечивает:

- визуализацию подстилающей поверхности, деревьев, лесных массивов, туманной дымки;

- визуализацию сооружений (заводов, домов, столбов, опор, линий электропередач), движущихся объектов (танков, БТР, БМП);
- визуализацию объектов после поражения оружием;
- визуализацию полета ПТУР, НАР и снарядов;
- имитацию внешней визуальной обстановки, наблюдаемой через оптическую систему прицельного комплекса "Шквал-В" на ИТ-23В.

Предъявление летчику визуальной обстановки, видимой через остекление кабины, осуществляется посредством трехканальной проекционной системы (рис. 17.6, см. цветную вкладку). Расчеты показали, что такая проекционная система в пять раз дешевле традиционных оптических коллиматорных устройств и удовлетворяет требованиям по качеству картинки, сформулированным в тактико-техническом задании на тренажер.

Отражательные диффузно-рассеивающие экраны отстоят от рабочей точки зрения (РТЗ) по нормали к ним на 3,65 м, что позволяет сохранить у оператора иллюзию глубины пространства. Углы обзора из РТЗ составляют $38,55^\circ$ (Г) $\times$ 50° (В) для левого бокового канала, 40° (Г) $\times$ 30° (В) – для центрального канала и 50° (Г) $\times$ $38,55^\circ$ (В) – для правого бокового канала.

Отношение площади визуализируемых областей к площади фигур, характеризующих обзор через все боковое и переднее остекление кабины за вычетом уменьшающих обзор бронешитков, составляет величину 0,476. Все незаполненные изображениями части остекления кабины зашторены.

Оригинальная конструкция экранного комплекса позволяет производить настройку и юстировку видеопроекторов, в том числе повороты в горизонтальной плоскости, наклоны в вертикальной плоскости, подъем и опускание в заданных пределах при изменении высоты РТЗ пи-

лота от уровня пола. Конструкция также обеспечивает изменение наклонов плоскостей, на которые проецируются изображения от видеопроекторов в пределах от $1^{\circ}24'$ до $31^{\circ}24'$.

"Центральный проектор" расположен строго по продольной оси вертолета и проецирует изображение на центральный экран. "Правый проектор" повернут на угол $47^{\circ}52'$ вправо и проецирует изображение на экран, конструктив которого расположен перед правым боковым стеклом вертолета. "Левый проектор" расположен на выносном кронштейне установки и повернут таким образом, что проецирует изображение сначала на зеркало (установленное на выносном кронштейне), а затем на экран, конструктив которого расположен перед левым боковым стеклом вертолета.

В тренажере "Краб" использованы XGA-проекторы Sanyo PLC-XW10 со световым потоком 650 ANSI-лм и сроком службы лампы 2000 ч. Угловая высота оптической точки в центральном канале составляет $2,34'$, в боковых – $2,93'$. При коэффициенте отражения материала экранов $\rho = 1$ яркость в белом от вышеуказанного проектора составляет 23 кд/м^2 в центре левого, 33 кд/м^2 – центрального и 21 кд/м^2 – правого экранов.

Для создания уровня освещенности, необходимого для нормального восприятия проецируемого на экраны изображения, в тренажере предусмотрена установка светозащитного тента. Тент полностью накрывает тренажер, включая рабочее место летчика и рабочие места инструкторов (ПКУ).

Комплекс средств обучения и тренировки летчиков вертолета Ка-50 (комплексный тренажер "Краб") в ноябре 2002 - марте 2003 годов успешно прошел предварительные испытания с привлечением специалистов и летчиков – испытателей ОАО "Камоу". В соответствии с выводами комиссии, комплексный тренажер "Краб" может использоваться в качестве назем-

ного средства обучения летчиков вертолета Ка-50 для поддержания высокой боевой выучки при максимальной экономии материальных средств и технического ресурса боевой авиационной техники.

Успешное применение принципов, методов и готовых решений, разработанных при создании тренажерных комплексов для подготовки космонавтов, позволило в течение двух лет создать опытный образец полноценного комплексного тренажера боевого вертолета. Эта разработка подтвердила практическую эффективность предложенной авторами технологии тренажерных комплексов и применимость ее к созданию тренажеров для подготовки операторов к работе в различных сферах человеческой деятельности.

17.2. ТРЕНАЖЕР МАССОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Необходимость создания и использования тренажеров для обучения вождению автомобиля была осознана давно [7, 16, 43, 96].

Широкое распространение, например, получили компьютерные автомобильные симуляторы, которые обеспечивают закрепление теоретических знаний и правил дорожного движения, позволяют моделировать дорожные ситуации и предлагают обучаемому найти верное решение, связанное с действиями водителя в той или иной ситуации. Однако следует иметь в виду, что в них обычно используются упрощенные органы управления (компьютерные джойстики), упрощенные математические модели систем автомобиля, а также системы визуализации с ограниченным уровнем детализации отображаемой картины.

Применение таких средств для практической подготовки водителей может привести к потере способности адекватно воспринимать важные детали реальной дорожной обстановки (эффект туннель-

ного зрения) и опасности приобретения ложных моторных навыков управления автомобилем, что является серьезным недостатком компьютерных автосимуляторов. Чрезмерное увлечение подобными средствами обучения способно не уменьшить, а наоборот, увеличить риск возникновения аварийных ситуаций на дорогах.

Большей адекватностью отличается воспроизведение дорожной ситуации на тренажерах (например отечественных тренажерах серии АТ), которые выполняются на базе реальных кабин автомобилей. Такие тренажеры используются для начальной подготовки водителей: ознакомления обучаемых с измерительными приборами и порядком работы с органами управления автомобиля, а также для формирования и закрепления первоначальных (моторных) навыков управления автомобилем.

Следует отметить, что применение тренажеров наиболее перспективно для подготовки водителей, работающих в особых условиях (оперативные службы милиции, гонщики и др.), так как на тренажерах можно безопасно отрабатывать езду с высокой скоростью, в экстремальных, сложных дорожных условиях (снег, туман, гололед), при возникновении аварийных ситуаций, влияющих на безопасность движения. Однако в этом случае в тренажере должно использоваться близкое к реальному рабочее место водителя (РМВ), и необходимо адекватно и полно имитировать системы автомобиля, процесс его движения и окружающую обстановку с учетом рельефа местности, состояния дорожного покрытия, увода колес и скольжения (юза).

Создание такого тренажера сопряжено со значительными финансовыми затратами, превышающими затраты на обучение с использованием реального автомобиля. В силу указанных причин и большого разнообразия типов автомобилей на рынке основным средством практической подготовки водителей в

автошколах и учебных центрах по-прежнему является поездка на реальном автомобиле в сопровождении инструктора.

В 1998–1999 гг. в Центре тренажеростроения (г. Москва) был выполнен проект создания прототипа сравнительно недорогого тренажера массового автомобиля (ТМА), обеспечивающего решение следующих основных задач:

- формирование и закрепление навыков вождения легковых автомобилей в соответствии с Правилами дорожного движения (ПДД);

- подготовку водителя к действиям в критических ситуациях и при отказах основных агрегатов автомобиля, влияющих на безопасность движения;

- самостоятельную подготовку обучаемых;

- воспроизведение и анализ развития сложных проблемных и аварийных дорожных ситуаций;

- объективную оценку профессиональной пригодности водителей.

Для достижения высоких технико-экономических показателей и эффективности использования тренажера при его создании была поставлена задача унификации технических решений (применительно к разным типам автомобилей), применения новых технологий в области визуализации дорожных ситуаций, а также максимального использования методов, технологий и готовых решений, наработанных при создании тренажерных комплексов для подготовки космонавтов. Это позволило сократить сроки разработки и снизить стоимость проектирования и изготовления опытного образца тренажера. Одновременно ставилась задача расширения возможностей тренажера, моделирования различных (в том числе, опасных) условий и аварийных ситуаций: преодоления препятствий, столкновения с объектами внешнего мира, пробуксовки и скольжения колес, съезда с дороги при резком повороте и опрокидывании.

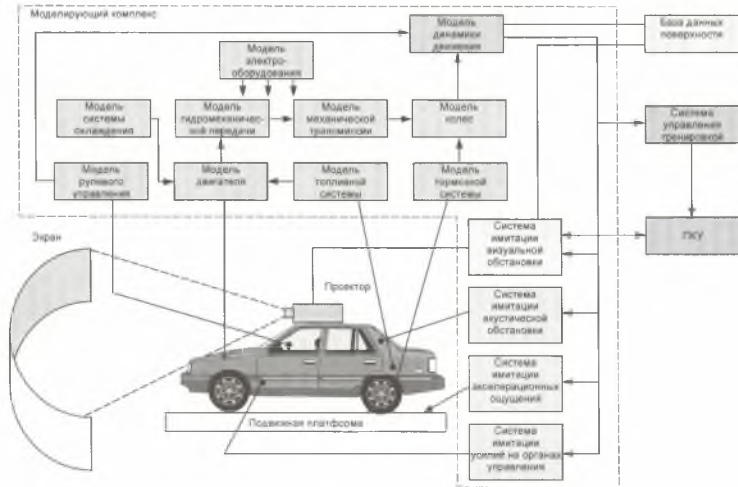


Рис. 17.7. Структурная схема автомобильного тренажера

При создании тренажера за основу была принята структура, показанная на рис. 17.7.

В качестве рабочего места водителя была использована передняя часть кузова автомобиля. Органы управления и контроля, имеющиеся в кабине, были сопряжены с моделирующим комплексом, средства которого позволяли реализовать математические модели систем автомобиля и его перемещения в пространстве.

В соответствии с типовой структурой тренажера, рассмотренной в гл. 2, в составе тренажера были разработаны также система управления тренировкой (СУТ), системы имитации визуальной обстановки (СИБО), акустической обстановки, усилий на органах управления, вычислительная система, система устройств сопряжения с объектом и система электропитания (две последние системы на рисунке не показаны). Создание системы имитации акселерационных ощущений в прототипе ТМА не предусматривалось.

Кабина автомобиля оборудована креслами водителя и пассажира, штатными органами управления и приборами. На штатных органах управления установлены датчики, которые фиксируют изменение положения рулевого колеса, педали тормоза, педалей подачи топлива и сцепления, рычагов переключения передач и стояночного тормоза. Сигналы состояния органов управления, снимаемые с датчиков, передаются в моделирующий комплекс на входы моделей соответствующих систем автомобиля.

Моделируемые параметры работы систем автомобиля выводятся через устройства сопряжения с объектом на панели приборов (указатель температуры охлаждающей жидкости, указатель уровня топлива, тахометр, спидометр, контрольные лампы указателя поворотов, уровня топлива, аварийного давления масла, аварийного отказа тормозов).

Система имитации усилий на органы управления позволяет осуществлять регу-

лируемую нагрузку органов управления в зависимости от характеристик движения автомобиля, вида дорожного покрытия и других параметров моделируемой ситуации.

Механизм загрузки и возврата рулевого колеса выполнен на основе регулируемого электропривода, в состав которого входит электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, регулятор напряжения и мультипликатор. Управление двигателем осуществляется изменением напряжения в цепи якоря.

Такой механизм загрузки позволяет обеспечить отработку и нештатных ситуаций, возникающих при проколе одного из передних колес. Загрузка рулевого колеса осуществляется электродвигателем в режиме противовключения, а его возврат и увод при имитации прокола переднего колеса – в двигательном режиме.

Механизм загрузки педали тормоза использует в качестве рабочего элемента две пружины разной жесткости. На первом отрезке хода педаль работает только одна из пружин, моделирующая линейное возрастание усилий на педали. В конце хода педали вступает в действие вторая пружина, обеспечивающая резкое возрастание усилий.

Механизм загрузки педали обеспечивает отработку нештатной ситуации "отказ тормозной системы", при которой происходит провал педали тормоза. Для этого предусмотрен специальный запорный механизм на основе электромагнита. При включении электромagnита шток, связанный с педалью тормоза, выходит из взаимодействия с загрузочными пружинами и воспринимает усилие возвратной пружины, которая возвращает педаль в исходное положение с минимальным усилием.

Механизмы загрузки педалей сцепления и подачи топлива, а также рычага стояночного тормоза, реализованы посредством установки пружин требуемой жесткости, обеспечивающих линейную

характеристику зависимости усилия на педали (рычаге) от величины хода.

Механизм загрузки рычага переключения передач позволяет перемещать рычаг с близким к реальному усилием и обеспечивает его фиксацию в положении включенной скорости, а также его связь с педалью сцепления (перемещение рычага в любое из положений включения передачи невозможно без нажатия на педаль сцепления). Фиксация рычага обеспечивается подпружиненными фиксаторами, а возвращение рычага в "нейтраль" – плоской пружиной. Для реализации связи рычага переключения передач с педалью сцепления на механизме устанавливается запорный рычаг, фиксирующий рукоятку переключения передач при отпущенной педали сцепления и освобождающий ее при нажатии педали.

Связь рабочего места водителя с вычислительной системой обеспечивается устройствами сопряжения с объектом на базе промышленного компьютера IPC-6806 с установленным в нем процессорным блоком PCA-6154L, АЦП PCL-818L, ЦАП PCL-727 и блоком ввода/вывода дискретных сигналов PCL-730 производства Advantech.

Комплекс моделирования работы автомобиля (см. рис. 17.7) включает в себя математические модели двигателя, рулевого управления, механической трансмиссии, гидромеханической передачи, колес, топливной системы, системы охлаждения, электрооборудования и тормозной системы. В системе предусмотрена возможность варьирования основных параметров как при настройке перед тренировкой, так и оперативно в процессе тренировки. В целях имитации нештатных ситуаций моделируются отказ тормозной системы, перегрев двигателя, отсутствие топлива и некоторые другие технические отказы.

Основным элементом системы моделирования объекта является модель динамики движения автомобиля, которая

обеспечивает расчет параметров движения автомобиля с учетом заданных дорожных условий и рельефа местности. Для решения этой задачи в составе модели динамики движения используется модель полигонального описания дорожного покрытия (база данных поверхности) и система моделирования дорожной обстановки (СМДО).

СМДО позволяет моделировать взаимодействие автомобиля с внешней средой. Объектами дорожной обстановки являются подвижные и неподвижные объекты (автомобили, трамваи, пешеходы, светофоры, шлагбаумы и др.). В составе СМДО создается до 40 программных подвижных объектов (ППО), которые наделяются способностью интеллектуальных действий: перемещение по заданным маршрутам, осуществление маневров, включая обгон активного (управляемого оператором) объекта. Таким образом, обеспечивается заданная насыщенность участка дороги в районе движения обучаемого.

Движение ППО организовано в соответствии с правилами дорожного движения. Маршруты могут задаваться инструктором на основе наборов отрезков, соединяемых между собой. Программно задается маршрутная скорость движения ППО, включение сигналов поворотов, стоп-сигналов при торможении, логика проезда перекрестков по светофору и в соответствии с правилами проезда нерегулируемых перекрестков. Логика поведения этих объектов программируется с учетом целесообразной для отработки этапа сложности ситуации и необходимости введения предаварийных и аварийных условий дорожной обстановки для привития обучаемому умения правильно действовать в таких ситуациях.

Модель динамики движения автомобиля строится с использованием законов механики на основе представления автомобиля как сложной динамической

системы твердых тел, в состав которой входят:

- а) подпрессорная масса (кузов);
- б) неподпрессорные массы, приведенные к колесам (колеса в сборе с упругими шинами и тормозными барабанами).

Уравнения движения системы твердых тел составляются на основе уравнений Лагранжа II рода в обобщенных координатах. В качестве обобщенных координат для кузова используются продольные, поперечные и вертикальные перемещения центра масс и угловые перемещения по курсу, крену и тангажу. Для неподпрессорных масс (колес) в качестве обобщенных координат приняты продольные линейные перемещения осей колес, угловые перемещения колес относительно их осей и вертикальные линейные перемещения неподпрессорных масс. Для моделирования взаимодействия колес с поверхностью в базу данных поверхности заносятся данные макропрофиля (высота точки и нормаль к опорной поверхности) и микропрофиля (длина и высота неровностей, их форма и характер чередования).

Из эмпирических данных следует, что на грунтовых, асфальтовых и бетонированных дорогах большинство неровностей по форме почти совпадает с синусоидой со сглаженными вытянутыми краями. На бетонированных дорогах неровности имеют треугольную форму, определяемую проседанием плит. Поэтому высота под каждым колесом автомобиля рассчитывается путем сложения высоты точки, считанной из базы данных поверхности, и синусоидального возмущения, параметры которого (амплитуда и длина волны, начальные фазы для рассинхронизации колебаний колес левого и правого борта) задаются с учетом выбранного типа покрытия. Тип покрытия (асфальтовое или бетонное, булыжник, песок, укатанная грунтовая дорога и т.д.), а также характер поверхности (дорога может быть сухой или мокрой, засне-

женной или обледенелой) задается в процессе подготовки тренировки.

В результате решения дифференциальных уравнений динамики движения автомобиля в каждом такте моделирования рассчитываются в реальном масштабе времени компоненты главного вектора и главного момента активных сил, приложенных к центру масс, компоненты вектора активных сил, приложенных к центрам колес, и компоненты момента активных сил относительно осей колес.

В процессе численной реализации модели динамики на базе современной ПЭВМ обеспечивается выполнение расчетов за время, не превышающее 5 мс (при такте моделирования 30 мс).

Внешняя визуальная обстановка моделируется в тренажере компьютерными средствами на основе геометрического моделирования необходимых участков трассы, города и автодрома. Геометрическая модель включает дома, сооружения, заборы, деревья и кустарники, дорожное полотно, попутный и встречный транспорт, светофоры, тротуары, дорожные знаки и т.д. При создании виртуального мира для ТМА была поставлена задача обеспечения "узнаваемости" улиц населенного пункта, в котором производится обучение и сдача экзаменов по вождению. Поэтому как в СИВО, так и в СМДО использованы данные о размещении и геометрических размерах реальных улиц, перекрестков и светофоров в г. Новочеркасске.

В результате измерения временных характеристик канала формирования изображения было установлено, что при визуализации сцены, состоящей из 2000 текстурированных полигонов, в кадре средняя частота формирования новых изображений составляла 20 ... 30 кадров в секунду, что можно считать приемлемым с точки зрения характеристик зрительного анализатора человека.

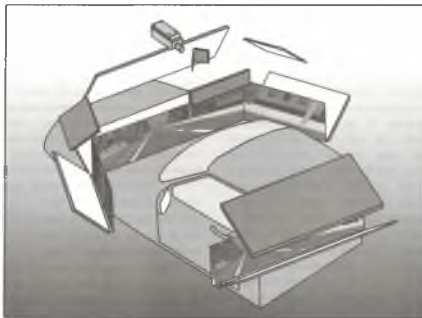


Рис. 17.8. Система светодельительных зеркал

Изображение видимой области пространства формируется в соответствии с положением водителя в системе координат сцены и отображается в плоскости, перпендикулярной линии визирования. Это изображение проецируется на расположенный перед водителем экранный комплекс и дает возможность водителю наблюдать дорожную обстановку.

Изображение на лобовом стекле и внутреннем зеркале заднего вида создается с помощью одного видеопроектора и просветного экрана, установленного вертикально перед лобовым стеклом параллельно его нижней кромке. Лобовое стекло и зеркало заднего вида в кабине были удалены, а изображение, генерируемое графической станцией для воспроизведения водителю через лобовое стекло, включает в себя окно с изображением зеркала заднего вида.

Для расширения поля зрения обычно используют три генератора изображений и три экрана, которые "сшивают" изображения в горизонтальной плоскости.

Нами для формирования изображений в боковом остеклении кабины и в зеркале заднего обзора был апробирован другой более экономичный способ формирования изображений. Соотношение между высотой и шириной изображения, которое нужно воспроизводить на экране для полной визуализации лобового стекла и внутреннего зеркала заднего вида, составляет 0,25, а соотношение между высотой и шириной полного раstra проектора – 0,75. Поэтому в полном изображении, которое воспроизводится одним проектором, оказывается возможным выделить 4 различные части ("окна") для одновременной визуализации и переднего поля обзора, и двух боковых, и заднего вида. Для этого (рис. 17.8) следует разделить световой поток проектора сразу за объективом на 4 части, развести их в пространстве и спроецировать каждую из них на экран, размещенный у соответствующего проема кабины. При этом длина пути света от объектива до каждого из экранов должна быть одина-

ковой. Указанная задача решается с помощью системы отражающих и светоделительных зеркал, которые отсекают соответствующие части исходного светового потока и направляют их на экраны, устанавливаемые перед лобовым стеклом, справа, слева и сзади макета автомобиля.

Для воспроизведения характерных при эксплуатации автомобиля акустических шумов в кузове кабины водителя располагаются звуковые колонки. Система имитации акустической обстановки содержит базу аудиоданных и программу минширования и воспроизведения шумов в соответствии с расчетными параметрами моделей систем.

С учетом моделируемой ситуации в звуковых колонках воспроизводятся шумы стартера, двигателя, колес, шестерен коробки передач (при неправильном переключении); воспроизводятся звуки, соответствующие столкновению с внешними объектами, "визг" тормозов при резком торможении, звуковые сигналы подвижных объектов СМДО.

Для подготовки и проведения тренировки обучающий персонал использует средства пульты контроля и управления (ПКУ) и программные средства системы управления тренировкой. По способу построения и функциям эти средства идентичны тем, которые использовались в СУТ описанных ранее тренажеров и тренажерных комплексов. В частности, СУТ ТМА обеспечивает:

- задание начальных условий для текущей тренировки (установка характеристик автомобиля, выбор трассы, ввод параметров, определяющих дорожную обстановку и др.);
- управление тренировкой, включая управление дорожной обстановкой и светофорами;
- контроль положения автомобиля, работы его систем и действий обучаемого;
- вод отказов и нештатных ситуаций;
- фиксацию ошибок, допускаемых обучаемым водителем.

В состав СУТ включаются программные средства автоматизированной оценки операторской деятельности, документирования информации и печати итогового протокола тренировки. Эти средства дают возможность фиксировать результаты обучения либо в автоматизированном, либо в автоматическом режиме.

В автоматизированном режиме задача выявления и фиксации ошибок по каждому этапу тренировки возлагается на инструктора. Средства системы позволяют инструктору фиксировать допущенные обучаемым ошибки в отображаемом на экране формате, который включает перечень типовых ошибок водителей. Каждой из типовых ошибок присвоен определенный вес, и при появлении ошибки обучаемому начисляются штрафные баллы. После завершения тренировки подсчитывается количество штрафных баллов и выставляется итоговая (суммарная) оценка за тренировку. При необходимости эта оценка может быть скорректирована инструктором и результаты (протокол тренировки) заносятся в базу данных обучаемых.

Достоинством данного подхода является простота реализации и ясность полученной оценки для инструктора и обучаемого. Однако выставленная таким образом оценка остается субъективной.

В полностью автоматическом режиме программные средства системы распознают и регистрируют некоторые типовые ошибки обучаемых без участия инструктора. Зарегистрированные ошибки выводятся на формат инструктора и сохраняются в протоколе тренировки. Перечень ошибок, распознавание которых обеспечивается в автоматическом режиме, приведен в табл. 17.1.

Программный комплекс тренажера реализуется на базе вычислительной системы, в составе которой используются три компьютера средней производительности. На базе одного из них реализуются

**17.1. Перечень ошибок, распознавание которых обеспечивается
в автоматическом режиме работы системы**

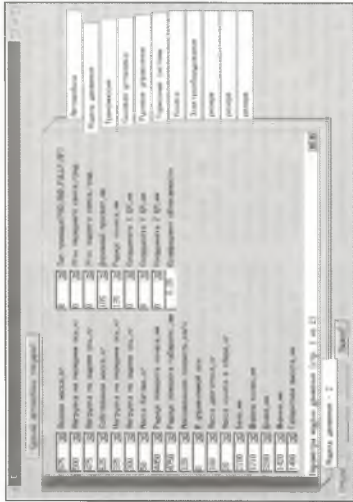
Наименование ошибки	Описание ошибки
Зацепил обочину	Один из габаритных размеров автомобиля вышел за пределы трассы
Вне дороги	Геометрический центр автомобиля вышел за пределы трассы
Столкновение с препятствием	Произошло столкновение с неподвижным объектом СМДО
Столкновение с ОД	Произошло столкновение с перемещающимся объектом
Превышение скорости	Скорость автомобиля превысила значение, указанное на знаке ограничения скорости для этого участка дороги, или 60 км/час на участках дороги вне действия знаков ограничения скорости
Неправильное направление	Автомобиль движется по трассе в запрещенном направлении
Неправильная остановка	Остановка автомобиля в зонах действия знаков "Остановка запрещена", "Остановка автобуса", "Переход", на перекрестке дорог, на левой полосе движения
Неправильное положение	Движение автомобиля одновременно по двум полосам дороги
Запрещенный знаком поворот	Автомобиль выполнил поворот, запрещенный знаком "Поворот запрещен"
Несоблюдение сигнала светофора	Автомобиль проехал перекресток на запрещающий сигнал светофора

программные средства моделирования визуальной обстановки и акустических шумов; на базе второго компьютера исполняются пакеты моделирования движения и систем автомобиля, а также средства СУТ; третий компьютер используется для связи моделирующего комплекса с приборами и органами управления в кабине автомобиля.

Первые два компьютера служат одновременно терминалами ПКУ. Средства первого компьютера позволяют наблюдать на экране монитора поведение автомобиля в синтезированной среде, а также выбирать для тренировки различные виртуальные миры, такие как "Город" или "Автодром". На экранах мо-

нитора второго компьютера отображаются параметры моделирования систем автомобиля и характеристики его движения, а также результаты автоматизированной оценки действий обучаемого. С помощью этого терминала инструктор может подготовить начальные условия тренировки, оперативно вводить или снимать нештатные ситуации, работать с экзаменационными карточками водителя.

В качестве общего математического обеспечения ВС была использована оболочка реального времени ТРИО (в реализациях для IBM OS/2 и Windows-98/NT), разработанная для тренажерного комплекса Российского сегмента МКС и описанная в гл. 8. Инструментальные



средства ТРИО были использованы для оперативной разработки и отладки моделей и форматов пакетов МОБ и СУТ.

Одна из проблем массового использования автомобильного тренажера состоит в том, что для каждого типа автомобиля, строго говоря, требуется устанавливать свою кабину и свои программные средства моделирования его систем. Это связано не только с различием интерьеров разных моделей автомобилей, но и с необходимостью учитывать разницу в усилиях на органах управления и в поведении автомобиля на дороге. Использование же множества комплексных тренажеров для разных типов автомобилей с финансовой точки зрения не оправдывается. Очевидно, что учебный центр или автошкола редко могут приобрести множество комплексных тренажеров даже для основных, наиболее массовых моделей легковых автомобилей.

В тренажере массового автомобиля была сделана попытка частичного решения этой проблемы за счет применения при разработке основных систем тренажера принципов унификации и модульности, обеспечения возможности изменения параметров математических моделей систем и настройки в механизмах загрузки органов управления.

Для того, чтобы реализовать такую возможность, с учетом принятой классификации технических характеристик автомобилей отечественных и иностранных марок были выделены некоторые конструктивные особенности и характеристики, которые могли быть описаны в рамках одной модели с настраиваемыми параметрами. Упорядочение типов автомобилей осуществлялось, в частности, по объему цилиндров двигателя (микро, особо малый, малый, средний, представительский, внедорожный, минивэны и микроавтобусы), по типу кузова (седан, пикап, универсал и т.д.), по типу двигателя (дизельный, карбюраторный, газогенераторный), по типу привода

(переднеприводные, заднеприводные, полноприводные). Характеристики и конструктивные особенности узлов автомобиля используются для определения параметров, которые присутствуют в моделях систем автомобиля. Так, в зависимости от типа кузова, его геометрических характеристик и расположения двигателя рассчитываются значения координат центра масс моделируемого объекта, коэффициента сопротивления воздуха, моменты инерции вращающихся масс. Значения соответствующих параметров заносятся в базу данных, либо вводятся на этапе подготовки к тренировке. На рис. 17.9 приведены в качестве примера форматы настройки параметров модели движения и модели силовой установки автомобиля.

В алгоритмах моделирования систем ТМА используются указанные параметры. Например, с учетом параметров двигателя рассчитываются значения полной окружной силы на колесах, приращение массы и момента инерции автомобиля за счет вращающихся масс. Количество и расположение ведущих осей учитывается в алгоритме распределения мощности по колесам, распределения сил и вращающих моментов при повороте.

Благодаря максимальной унификации программных и аппаратных средств, а также возможности настройки параметров моделей, в тренажере массового автомобиля на базе кабины автомобиля "Москвич-2141" удалось обеспечить (с некоторыми допущениями) имитацию управления такими разными автомобилями, как ГАЗ-3102 "Волга", "Volvo-760", "Audi A4 1.6", "BMW 318 tds COMPACT", "Ока-111".

Испытания тренажера массового автомобиля с привлечением экспертов ГИБДД показали, что разработанные модели систем и динамики автомобиля достаточно корректно воспроизводят процесс управления автомобилем и его пространственное движение с учетом параметров внешней среды. Относи-

тельная погрешность скорости движения автомобиля (с учетом погрешности визуализации) не превышала 12 %.

Учитывая широкие масштабы производства и продажи массовых автомобилей, можно ожидать, что по мере удешевления автомобильных тренажеров они будут находить все более широкое распространение для подготовки водителей.

Средства тренажера можно эффективно использовать в учебных заведениях при подготовке инженеров автомобильного профиля, как для получения навыков вождения автомобиля, так и для проведения лабораторных исследований с использованием моделирующего комплекса тренажера. В частности, на базе описанного тренажера для студентов университета проводились лабораторные работы, связанные с исследованием нагрузочных и скоростных характеристик карбюраторных двигателей, а также исследованием регулировочных характеристик по составу смеси.

Результаты выполнения проекта тренажера массового автомобиля позволили сделать важные для развития теории и технологии тренажеростроения выводы о том, что уникальные космические тренажеры и автомобильные тренажеры широкого применения могут создаваться на единых принципах, на основе общей типовой структуры, и с применением идентичных программных и аппаратных решений.

17.3. ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ

В начале 90-х г. XX в. специалистами Центра тренажеростроения и подготовки персонала (г. Москва) и сотрудниками Ростовского государственного университета путей сообщения был создан тренажерный комплекс для профессиональной подготовки машинистов электропоездов. В составе комплекса разрабатывались тренажер машиниста электропоезда

пассажирского поезда (типа ЧС-4т) и тренажер машиниста грузового поезда (электропоезда типа ВЛ-80Т). В последующем принятые системные решения позволили включить в состав тренажерного комплекса "Виртуальную железную дорогу" – систему профессиональной подготовки диспетчеров Северо-Кавказской железной дороги; при этом становится возможным проведение тренировок машинистов совместно с персоналом обеспечения движения составов.

При создании тренажеров предполагалось использование их средств не только для профессиональной подготовки специалистов, но и для проведения исследований систем большегрузных составов. В этих целях наряду с имитационной моделью тормозной системы в состав моделирующего комплекса была включена физическая модель сцепки и тормозной системы, имитирующая соединение более 60-ти вагонов состава; для сопряжения этой системы с ВС использовалась система датчиков.

Состав систем и структура тренажерного комплекса определялась с учетом изложенных в гл. 3 принципов модульности и унификации интерфейсов взаимодействия всех его компонентов.

В качестве рабочих мест машинистов использовались кабины электропоездов ЧС-4т и ВЛ-80Т со штатными панелями машинистов и полным набором органов управления (рис. 17.10). На лобовое стекло кабины проецировалась визуальная картина, которую наблюдает машинист вдоль пути следования поезда. Для этого перед лобовым остеклением каждой кабины был установлен просветный экран, на который подавалось изображение с проектора, установленного на крыше кабины другого электропоезда.

Локальная вычислительная сеть тренажера формировалась на базе трех персональных компьютеров: один из них обеспечивал моделирование динамики движения состава и работы оборудования



Рис. 17.10. Рабочее место машиниста

электровоза, а также реализацию задач управления тренировкой; второй – использовался для имитации визуальной обстановки и акустических шумов, а третий – как терминальный процессор для сопряжения с техническими устройствами тренажера.

При формировании математической модели объекта были разработаны и включены в состав специального программного обеспечения тренажера модели профиля пути, продольной динамики поезда, как многозвенной распределенной массы, и модели оборудования электровоза (тяги электровоза, торможения поездного состава, цепей управления локомотива). В составе специального программного обеспечения была разработана также модель дорожной обстановки (состояние светофоров, стрелок, профиль пути и др.). При разработке моделей предусматривалась возможность моделирования нештатных ситуаций (неисправностей в системах электровоза).

Устройства связи с объектом обеспечивали преобразование в удобную для

обработки форму сигналов, поступающих от органов управления электровозом и датчиков давления тормозной станции, а также вывод результатов моделирования работы систем электровоза на стрелочные приборы и сигнализаторы пультов машиниста.

В процессе создания железнодорожных тренажеров была разработана оригинальная система имитации визуальной обстановки, которая строилась на основе комбинирования видеосюжетов и средств машинного синтеза изображений. Основная база данных формировалась на основе видеосъемок участков реальной железной дороги с учетом возможного изменения маршрута движения при переключении стрелок. На оцифрованную картину внешнего закабинного пространства накладывались синтезированные изображения огней светофоров (в соответствии с моделируемой ситуацией), препятствия на пути следования, оползни, выбросы пути и т.п.

Описанный способ позволяет строить относительно недорогую систему ви-



Рис. 17.11. Сюжет визуальной обстановки, наблюдаемой машинистом

зуализации при обеспечении высокой степени реалистичности и качества формируемого изображения. На рис. 17.11 приведен сюжет визуальной обстановки, которую наблюдает машинист в процессе тренировки на тренажере. Программные средства визуализации обеспечивают синхронизацию воспроизводимой обстановки с моделируемой скоростью движения состава, задаваемой машинистом с помощью органов управления электровозом, и текущим положением наблюдателя.

Для более полного моделирования условий реальной деятельности машиниста в составе тренажера разработана система имитации акустических шумов. Этой системой воспроизводятся различные аудиозффекты, которые имеют место в процессе управления локомотивом: шумы тяговых электродвигателей, характерные шумы от включения той или иной бортовой системы, свисток, тифон и т.п.

В качестве рабочего места инструктора используется пультый модуль, в который встраивается компьютер с соответствующим программным обеспечением. Средства системы управления тренировкой позволяют инструктору начинать и завер-

шать тренировку, задавать исходные данные, вводить нештатные ситуации, менять цвета огней светофоров и выбирать маршрут проезда (основной или боковой путь).

На рис. 17.12 приведен один из форматов СУТ, который позволяет машинисту контролировать состояние систем электровоза.

Принятые при построении тренажера технические решения обеспечивают достаточно высокую степень адекватности имитации движения поезда по конкретному участку пути и условий работы машиниста при отработке навыков управления электровозом на тренажере.

В разработанной версии тренажера в целях уменьшения затрат внешняя визуальная обстановка воспроизводится только на лобовом стекле кабины. При необходимости обеспечения более полного подобию можно дополнительно установить два боковых экрана и на них формировать визуальную картину, соответствующую изображениям в левом и правом остеклении кабины.

Наличие в контуре тренажера математических моделей систем электровоза и физической модели тормозной системы

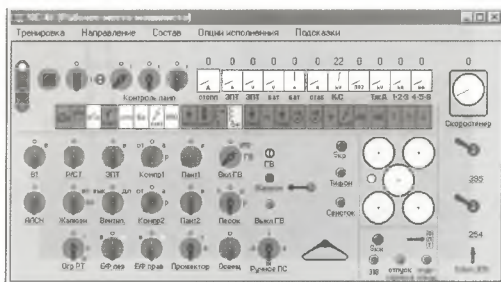


Рис. 17.12. Формат СУТ для контроля состояния бортовых систем

дает возможность использовать его средства для постановки лабораторного практикума при обучении студентов вуза, в частности, в лабораторных работах, связанных с исследованием давления в тормозной магистрали железнодорожного поезда, а также его тормозных цилиндров и запасных резервуаров.

В больших депо или в учебных заведениях, где количество тренажеров необходимо увеличивать, а финансовые средства ограничены, целесообразно применять компьютерную версию тренажера, в которой макет кабины электровоза с панелями приборов и органами управления не используется. В этом случае средствами компьютера создается виртуальный аналог рабочего места машиниста,

т.е. на дисплей выводится схематичное изображение панели машиниста электровоза и обеспечивается возможность, наблюдая показания приборов и используя средства клавиатуры, изменять положение органов управления электровозом. Рабочее место преподавателя (инструктора) реализуется на базе второго компьютера. На его мониторе дублируется изображение, выводимое машинисту, а также выводятся форматы управления тренировкой, выборы маршрута и задания нештатных ситуаций.

Программные средства моделирования систем электровоза, имитации визуальной и акустической обстановки в указанном варианте можно использовать такие же, как в базовой версии тренажера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов А.А., Бабенко В.С. Динамические характеристики зрения // Техника кино и телевидения. 1970. № 5.
2. Адам Д. Восприятие, сознание, память. Размышление биолога. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 152 с.
3. Аксенов В.Д. Систематизация требований и классификация технических средств подготовки и обучения авиационных специалистов // 2-я науч.-техн. конф. "Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи": Сб. докл. / ЦАГИ. Жуковский, 2003. 238 с.
4. Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1972. 360 с.
5. Александров В.В. и др. Математические задачи динамической имитации полета. Под ред. В.А. Садовниченко. М.: Изд-во МГУ, 1986. с. 181.
6. Александров В.В. Об имитации кажущегося ускорения // ДАН СССР. 1980. Т. 256. № 3.
7. Амен Р. и др. Вопросы применения тренажеров для обучения вождению автомобиля. Перевод № 84/2567. М.: ВЦП, 1989. 27 с.
8. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Введение в проблему качества. М.: Вооружение. Политика. Конверсия, 2001. 400 с.
9. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1989.
10. Бабенко В.С. Имитаторы визуальной обстановки тренажеров летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978.
11. Бабенко В.С. и др. Имитаторы и тренажеры: Сб. науч. тр. Вып. 1. Часть 1. Киев, 1973. 172 с.
12. Бабенко В.С. Оптика телевизионных устройств. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1982.
13. Базилевский А.Н. Аналитическая зависимость интенсивности ощущения вращения от угловой скорости // Вопросы авиационной эргономики: Сб. науч. тр. Вып. 1 / КИИГА. Киев, 1972.
14. Базилевский А.Н. О количественной оценке восприятия оператором перемещения в пространстве в связи с задачей подвижности кабины имитатора полета. Тренажеры и имитаторы. № 2. 1975.
15. Базилевский А.Н., Гузий А.Н. Пороговые соотношения для ощущений вращения. В кн.: Вопросы авиационной эргономики. Сб. научных трудов. Вып. 1 / КИИГА. Киев, 1972.
16. Базилевский А.Н., Гузий А.Н., Мельник А.А. Тренажеры для операторов транспортных средств. Киев: Техника, 1983. 141 с.
17. Безруков Г.В. и др. Прогрессивные структуры вычислительных систем для автономных тренажеров // Мат. науч.-техн. семинара "Технические средства и технологии для построения тренажеров". Вып. 3. Звездный городок, 1998. С. 73–77.
18. Безруков Г.В., Фоменко В.В. Программная оболочка ТРИО в тренажерах МКС. Материалы науч.-техн. семинара "Технические средства и технологии для построения тренажеров". Вып. 3. Звездный городок, 1998. С. 66–69.
19. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность–машина. М.: Машиностроение, 1973.
20. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 248 с.
21. Боднер В.Ф., Закиров Р.А., Смирнова И.Н. Авиационные тренажеры. М.: Машиностроение, 1978.
22. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в механике. М.: Наука, 1975. 319 с.
23. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. М.: Радио и связь, 1984.
24. Буков В.Н., Zubov Н.Е. Релейное управление на основе алгоритма с прогнозирующей моделью // АиТ. 1986. № 6. С. 36–42.

25. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Аэродинамика самолета. Динамика продольного и бокового движения. М.: Машиностроение, 1979.
26. Веккер Л.М. Психика и реальность: единая теория психических процессов. М.: Смысл, 1988 г. 685 с.
27. Великохатный Р.И., Вяткин С.И., Гимаутдинов О.Ю. и др. "Ариус" – семейство 3D графических систем реального времени для PC платформ // Тр. 7-й Междунар. конф. "Графикон-97". Москва, 1997.
28. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации. 2-е изд., М.: Машиностроение, 1982. 400 с.
29. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
30. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. М.: Машиностроение, 1982.
31. Вудсон У., Конвер Д. Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов. Пер. с англ. М.: Мир, 1968. 518 с.
32. Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Каинов Н.Р., Чижик С.Е. Архитектурные особенности системы визуализации реального времени на основе DSP // Автоматрия. 1999. № 1.
33. Газенко О.Г., Чехонадский Н.А. Математическая модель рецептора гравитации // Проблемы космической биологии. Сб., т. XII. Л.: Наука, 1971.
34. Гончаревский В.С. Радиоуправление сближением космических аппаратов. М.: Сов. радио, 1976.
35. Городецкий В.И. Элементы теории испытаний и контроля технических систем. Л.: Энергия, 1978.
36. ГОСТ 21036–75. Тренажеры. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов.
37. ГОСТ 21659–76. Тренажеры авиационные. Термины и определения.
38. ГОСТ 23457–86. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения. М.: Изд-во стандартов.
39. ГОСТ В 15. 004–84. Стадии жизненного цикла изделий и материалов. М.: Изд-во стандартов, 1985.
40. ГОСТ Р В 29.05.005–95. Тренажеры военной техники. Общие эргономические требования. М.: Изд-во стандартов.
41. ГОСТ Р В 29.05.007–96. Интерфейс человеко-машинный. Общие эргономические требования. М.: Изд-во стандартов.
42. ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Изд-во стандартов.
43. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. Минск: Выш. шк., 1986.
44. Гусев В.М., Кисляков В.А. Численное моделирование на ЭВМ функции вестибулярного аппарата // XIV науч. Гагаринские чтения по авиации и космонавтике. Секция "Проблемы авиакосмической медицины и психологии": Рефераты сообщений. М., 1985.
45. Гуслиц В.С., Иларионов В.А., Игнатов Н.А. Автомобильные тренажеры. М.: Транспорт, 1975. 96 с.
46. Данилов Ю.А. Лекции по нелинейной динамике. М.: ПОСТМАРКЕТ, 2001.
47. Дидрих В.Е., Дикарев В.А. Контроль деятельности педагогов "глазами обучаемых" // Открытое образование. 2001. № 3. С. 49–54.
48. Дикарев В.А. Автоматизация выбора операций управления эргатическими радиоэлектронными объектами // Телекоммуникации, 2001, № 12. С. 34–38.
49. Дикарев В.А. Автоматизированная система управления тренажной подготовки операторов радиоэлектронных объектов специального назначения // Оборонная техника. 2002. № 3. С. 17–21.
50. Дикарев В.А. Алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы планирования тренажерной подготовки операторов. Автоматика и вычислительная техника. 2002. № 2. С. 71–80.

51. Дикарев В.А. Информационная система оперативного контроля действий летных экипажей по применению условных и реальных средств РЭБ // I Междунар. науч.-техн. конф. "Кибернетика и технологии XXI века": Сб. докл. Воронеж: Истоки НИИ Связи, 2000. С. 34-42.
52. Дикарев В.А. Использование статистических критериев для оценки математического моделирования компьютерных технических систем практического обучения // Информационные технологии и системы. Вып. 2. Воронеж: ВГТА, 1998.
53. Дикарев В.А. К вопросу разрешения конфликта качества тренажной подготовки операторов военных радиоэлектронных объектов // Вестник военного регистра. 2001. № 11. С. 28-33.
54. Дикарев В.А. Методы оценки качества имитационного моделирования в тренажерах радиоэлектронных объектов // Вестник военного регистра. 2002. № 2. С. 22-28.
55. Дикарев В.А. Обобщенный статистический критерий для оценки качества имитационного моделирования в тренажерах радиоэлектронных объектов // Вестник военного регистра. 2002. № 1. С. 19-22.
56. Дикарев В.А. Об одном аспекте формирования вторичных конфликтов качества применения тренажеров военного назначения // Вестник военного регистра. 2001. № 10. С. 33-37.
57. Дикарев В.А. О возможности оценки адекватности математического моделирования иерархических систем // Всероссийская науч.-техн. конф. "Научные чтения, посвященные памяти Н.Е. Жуковского": Сб. тезис. доклад. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998.
58. Дикарев В.А. О структуре конфликта в системе подготовки летных экипажей по задачам радиоэлектронной борьбы // Математическое моделирование технологических систем. Воронеж: ВГТА, 1999. Вып. 3. С. 45-50.
59. Дикарев В.А. О структуре навыков, приобретаемых летным составом на компьютерных технических системах практического обучения по задачам РЭБ // Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук. Нижний Новгород: НВЗРКУ ПВО, 1998.
60. Дикарев В.А. Программа планирования тренажной подготовки специалистов эрагических систем (Schedule TR): Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 200110938. М.: Роспатент, 2001.
61. Дикарев В.А. Программное обеспечение качественного планирования тренажной подготовки операторов // Вестник военного регистра. 2002. № 5. С. 20-23.
62. Дикарев В.А. Системное представление автоматизированного управления тренажной подготовкой операторов радиоэлектронных объектов в условиях комбинированного образования // Открытое образование. 2001. № 12. С. 34-41.
63. Дикарев В.А. Способ повышения качества применения тренажеров военного назначения // Вестник Военного Регистра. 2001. № 9. С. 9-14.
64. Дикарев В.А., Бабушис А.В., Толчков А.Н. Программа оценки адекватности тренажеров "глазами обучающихся" (Adequasy TR). // Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610931. М.: Роспатент, 2002.
65. Дикарев В.А., Поталов А.Н., Карпов И.Г. Оценка адекватности компьютерных систем тренажа с помощью обобщенного закона распределения // Междунар. науч.-техн. конф. "Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров": Сб. тезис. докл. Пенза: Приволжский дом знаний, 1999.
66. Дикарев В.А., Толчков А.Н., Лапин С.А. Облик информационной системы контроля технического состояния с элементами тренажа объектов связи и радиотехнического обеспечения полетов авиации / III Всерос. науч.-техн. конф. "Информационные технологии и системы". Воронеж: ВГТА, 1999. С. 62-64.

67. **Динамика** высокоскоростного транспорта / Под ред. Т.А. Тибилова: Пер. с англ. М.: Транспорт, 1988.
68. **Дубошин Г.П.** Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968 г. 716 с.
69. **Ефанов В.Н., Бодрунов С.Д.** Авиационные тренажеры пятого поколения: концепция виртуальной аэронавигационной среды // Мир авионики. 2001. № 2. С. 17–24.
70. **Жуков Г.П., Викулов С.Ф.** Военно-экономический анализ и исследование операций. М.: Воениздат, 1987.
71. **Зимелев Г.В.** Теория автомобиля. М.: Машгиз, 1959.
72. **Зубов Н.Е.** Синтез управления сближением по методу свободных траекторий на основе алгоритма с прогнозирующей моделью // АН СССР. Космич. исследов. 1990. Т. 28. № 4. С. 506–512.
73. **Исерлис Ю.Э., Мирошников В.В.** Системное проектирование двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1981.
74. **Казаков И.Е., Исаев В.Н.** Основы автоматических систем авиационного вооружения. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1991.
75. **Калиткин Н.Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
76. **Каток А.Б., Хасселблат Б.** Введение в современную теорию динамических систем. М.: Факториал, 1999.
77. **Козлов В., Литвинчук Н.** Почему не помог тренажер // Авиация и космонавтика. 1984, № 12. С. 38–39.
78. **Краммер Г.** Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.
79. **Красовский А.А.** Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1969.
80. **Красовский А.А.** Математическое моделирование, компьютерные системы обучения и тренажа. М.: ВВИА, 1989.
81. **Красовский А.А.** Основы теории авиационных тренажеров. М.: Машиностроение. 1995. 303 с.
82. **Красовский А.А.** Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1977.
83. **Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С.** Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М.: Наука, 1977.
84. **Кременец Ю.А.** Технические средства организации дорожного движения. М.: Транспорт 1991.
85. **Кубасов В.Н., Данков Г.Ю., Яблонько Ю.П.** Методы сближения на орбите. М.: Машиностроение, 1985.
86. **Кураков Л.П.** Метрология, стандартизация, сертификация: Терминологический словарь-справочник. М.: Изд-во стандартов, 1997.
87. **Курашвили А.Е., Бабияк В.И.** Физиологические функции вестибулярной системы. Л.: Медицина, 1975. – 280 с.
88. **Лебедев А.А., Соколов В.Б.** Встреча на орбите. М.: Машиностроение, 1969.
89. **Левантовский В.И.** Механика космического полета в элементарном изложении. М.: Наука, 1980.
90. **Литвак И.И., Ломов Б.Ф., Соловейчик И.Е.** Основы построения аппаратуры отображения в автоматизированных системах / Под ред. Брейтбарта. М.: Сов. радио. 1975. С. 352.
91. **Литвинов А.С., Фаробин Я.Е.** Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989.
92. **Лобас Л.Г.** Неголономные модели колесных экипажей / АН УССР, Институт механики. Киев: Наукова думка, 1986.
93. **Лурье А.И.** Аналитическая механика. М.: Физматгиз. 1961. 824 с.
94. **Макаров И.М. и др.** Теория выбора и принятия решения: Учебн. пособ. М.: Наука, 1982.
95. **Масалкин А.И., Пекарский А.В.** Моделирование визуальной обстановки в космических тренажерах / Аэрокосмический курьер. 2002. № 6.
96. **Мельник А.А.** Тренажеры для обучения водителей. Киев: Техника, 1973. 140 с.

97. Методические указания. Методы и организация обучения и тренировки операторов. Общие требования: РД В 50-616-86.
98. Наумов Б.А. Исследование и разработка методического обеспечения сертификации технических средств подготовки космонавтов: Дис. канд. техн. наук // ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 1999. 120 с.
99. Наумов Б.А., Фоменко В.В. и др. Объектно-ориентированная технология разработки тренажных средств космической техники // Мат. науч.-техн. семинара «Технические средства и технологии для построения тренажеров». Вып. 2. Звездный городок. 1996.
100. О роли комплексных тренажеров в подготовке летчиков к полетам на малой высоте // Сб. рефератов ВИНТИ «Авиастроение. Экспресс-информация». М.: 1989, № 42.
101. Основы сенсорной физиологии / Под ред. Р. Шмидта. М.: Мир, 1984.
102. Палейчук Л.И., Хоминич В.С. Математическое описание человека-оператора в эргатических системах управления // Кибернетика и вычислительная техника. Вып. 13. Киев: Наукова думка. 1972. С. 60-64.
103. Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов // Под ред. В.А. Панова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1980. 732 с.
104. Папирияк В.П., Пятибратов Г.Я., Усачев Н.Г., Сбоев Ю.М. Стабилизация компенсирующего момента привода при переменной скорости движения объекта обезвешивания в вертикальной плоскости. Тренажерные технологии и симуляторы – 2002 // Мат. науч.-техн. конф. / Под ред. Е.И. Юревича. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 207 с.
105. Папирияк В.П., Усачев Н.Г. Устройство обезвешивания тренажерных скафандров. Основные результаты испытаний полномасштабного макета. Тренажерные технологии и симуляторы – 2002 // Мат. науч.-техн. конф. / Под ред. Е.И. Юревича. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 207 с.
106. Папирияк В.П., Усачев Н.Г., Сбоев Ю.М., Ротыч Р.В. Системы активной компенсации сил сопротивления в горизонтальной плоскости устройства обезвешивания. Тренажерные технологии и симуляторы – 2002 // Мат. науч.-техн. конф. / Под ред. Е.И. Юревича. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 207 с.
107. Петров В.В. Качество кинопроекции. 2-е изд. М.: Искусство, 1982.
108. Петровский В.П. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Изд-во МГУ, 1984.
109. Печерский Г.П., Хорович В.А. Управление дорожным движением в городах. М.: Транспорт, 1989.
110. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. М.: Мир, 1981.
111. Понтригин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969.
112. Потоцкий С.И. и др. Дискретная многокритериальная задача выбора структуры проблемно-ориентированного комплекса устройств сопряжения с объектом // Изв. вузов. Электромеханика. Новочеркасск. № 1. 1985.
113. РД 50-598-86. Временное положение о сертификации продукции машиностроения в СССР.
114. Руководство ИСО/МЭК. 2. Стандартизация и смежные виды деятельности – Общий словарь. 1998.
115. Ряполов А.Ф. Сертификация. Методология и практика. М.: Изд-во стандартов, 1987.
116. Сандригайло Л.И. Вспомогательные методы диагностики в невропатологии и нейрохирургии: Атлас / Под ред. И.П. Антонова. Минск.: Выш. шк., 1986, 271 с.
117. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебн. пособ. М.: Логос, 2001. 563 с.
118. Система визуализации современного тренажера ПКБМ. Пенза. 1995. 99 с.

119. Система визуализации ТРАНЗАС. 2003 г. www.transas.ru.
120. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1985.
121. Справочник по теории автоматического управления / Под общ. ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987.
122. Справочник фирмы «Jane's» по военным тренажерам и системам имитации. 1989-1990.-583 с.
123. Стефанов Г.А. К вопросу исследования характеристик человека-оператора в системе дистанционного управления подводным аппаратом // Управление в пространстве. Т. 1. М.: Наука, 1973.
124. Султанов Р.Р., Дикарев В.А. Моделирование взаимодействия систем в виде бескоординатной игры в нормальной форме: Сб. науч.-метод. мат. Балашов: БВАИ, 2001.
125. Султанов Р.Р., Дикарев В.А. Общая математическая постановка задачи многокритериальной оптимизации // Междунар. академический журнал. 2001. № 1. С. 9-13.
126. Сысоев В.В., Дикарев В.А. Вероятностно-метрическая оценка адекватности математического моделирования радиотехнических систем при ограниченных натурных испытаниях // Радиотехника (Журнал в журнале). 1999. № 3. С. 72-76.
127. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. шк., 1976.
128. Тюменцев Ю.В. Интеллектуальные автономные системы // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 10.
129. Усачев Н.Г., Папирияк В.П., Ерейский В.Д. и др. Электромеханическая система подвижности тренажера многоосного шасси. Тренажерные технологии и симуляторы – 2002 // Мат. науч.-техн. конф. / Под ред. Е.И. Юревича. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 207 с.
130. Федеральная система сертификации космической техники научного и народнохозяйственного назначения: Сб. руководящих общесистемных документов / Российское космическое агентство. М.: Машиностроение, 1995.
131. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983.
132. Физиология человека и животных (общая и эволюционно-экологическая): Учебник для вузов // Под ред. А.Б. Когана. М.: Высш. шк., 1984. Ч. II. 288 с.
133. Фоменко В.В. и др. Виртуальный интерьер рабочего места инструктора в космическом тренажеростроении // Мат. 2-й междунар. науч.-техн. конф. «Новые технологии управления движением технических объектов». Том 3. Новочеркасск: 1999. С. 82-85.
134. Фоменко В.В. и др. Проблемы формирования исходных данных для разработки моделей систем КТРС МКС // Материалы научно-технического семинара «Технические средства и технологии для построения тренажеров». Вып. 2, Звездный городок, 1996.
135. Хартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Мир, 1970.
136. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.
137. Хуанг Грегори Т. Робот под костюм // Что нового в науке и технике. 2004. № 10 (24).
138. Хьюбель Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990.
139. Чаки Ф. Современная теория управления. М.: Мир, 1975.
140. Чудаков Е.А. Избранные труды. Т. 1. Теория автомобиля. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1961.
141. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. М.: ФИЗМАЛИТ, 2003.
142. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. М. Машиностроение, 1988.
143. Шевурдин Н.П., Жучкин В.С., Биченов В.В. Имитатор перегрузок. Описание изобретения к а.с. № 1535221 СССР, МКИ G09D/08.

144. Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р. Системы человек-машина: Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1980. 400 с.
145. Шибанов Г.Н. Количественная оценка деятельности человека в системе человек-машина. М.: Машиностроение, 1983.
146. Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. М.: Радио и связь, 1983.
147. Штейнбух К. Автомат и человек. М.: Сов. радио, 1967.
148. Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. М.: Радио и связь, 1982.
149. Шукшунев В.Е. и др. Тренажерные системы. М.: Машиностроение, 1981. 256 с.
150. Шукшунев В.Е. Новые информационные технологии в тренажеростроении // Аэрокосмический курьер. М. 2000. № 5.
151. Шукшунев В.Е. и др. О приемственности в развитии технологии создания современных тренажеров // 4-я междунар. науч.-практ. конф.: Тез. докл. Звездный городок, 2000.
152. Шукшунев В.Е. и др. Перспективы применения систем виртуальной реальности // Мат. науч.-техн. семинара «Технические средства и технологии для построения тренажеров». Звездный городок, 1994. С. 34–39.
153. Шукшунев В.Е. и др. Унифицированное рабочее место для начальной подготовки экипажей на базе системы виртуальной реальности // 3-я междунар. науч.-практ. конф. Тезисы докладов. Звездный городок, 1997.
154. Шукшунев В.Е. и др. Применение технологий виртуальной реальности для предтренажной подготовки космонавтов // Авиакосмическое приборостроение. М.: 2003. № 9.
155. Шукшунев В.Е. и др. Проблемы и пути создания человекомашинных комплексов подготовки операторов // Вопросы кибернетики. Моделирование человекомашинных кибернетических систем: Сб. тр. АН СССР. М. 1984.
156. Шукшунев В.Е. и др. Особенности построения комплекса тренажеров российского сегмента МКС // Мат. науч.-техн. семинара «Технические средства и технологии для построения тренажеров»: вып. 2. Звездный городок, 1996.
157. Шукшунев В.Е. и др. Современные воззрения на технологию создания космических тренажеров // 3-я междунар. науч.-практ. конф. Тез. докл. Звездный городок, 1997. С. 180–189.
158. Шульговский В.В. Основы нейрофизиологии: учеб. пособ. М.: Аспект Пресс, 2002. 277 с.
159. Юзов Н.И., Крючков Б.И., Шувалов В.А. Внекорабельная деятельность космонавтов (учебно-методическое пособие). Звездный городок, 1998 г.
160. Brandtberg H., Segerhammar P., Waldelof C. Head-mounted displays // Ericsson Review. 1997. N 1.
161. CAVE User's Guide, CAVE Library version 2.6 от 11.05.1997, University of Illinois at Chicago.
162. Clapp R.E. Problems of the visual display in flight simulation // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1985. № 549. P. 64–70.
163. Donaldson P. Teaching the Mangusta. Defense Helicopter, 1993, October – November.
164. Ferranti M. Removing the risk from rotorcraft testing // Aerospace America. 1993. August. P. 34–37.
165. Ringland R.F., Stapleford R.L. Motion Cue Effects on Pilot Tracking // Proc. 7th Annual Conf. on Manual Control. NASA SP-281, 1971.
166. Shirley D.L., Young L.R. Motion Cues in Man Vehicle Control: Effects of Roll Motion Cues on Human Operator's Behavior in Compensatory Systems with Disturbance Inputs // IEEE Trans. Man-Machine Systems. MMS-9. 1968. N. 4. P. 121–128.
167. Young L.R. The Current Status of Vestibular System Models // Automatica. 1969. V. 5. P. 369–383.

Производственно-техническое издание

**Шукшунов Валентин Ефимович,
Циблиев Василий Васильевич,
Потоцкий Сергей Иванович и др.**

ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРЕНАЖЕРЫ. ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.2001 г.

Редактор *Е.Д. Макаренко*
Переплет художника *Т.Н. Погореловой*
Корректор *М.Я. Барская*
Инженер по компьютерному макетированию *Г.Ю. Корабельникова*

Сдано в набор 12.07.05. Подписано в печать 20.09.05.
Формат 70×100 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 32,5 (в т.ч. вкл. 1,3). Уч.-изд. л. 32,05 (в т.ч. вкл. 1,28).
Тираж 2000 экз. Заказ 2590

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромывнский пер., 4

Оригинал-макет изготовлен в ООО "Издательство "Машиностроение-1"

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинал-макета в ОАО "Типография "Новости"
105005, Москва, ул. Фридриха Энгельса, 46



Рис.1.1. Экипаж космической станции на тренажере

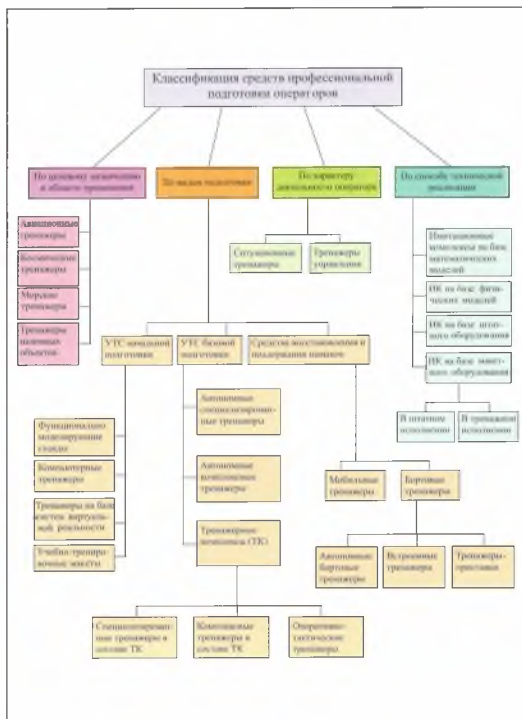


Рис.1.6. Классификация средств профессиональной подготовки операторов

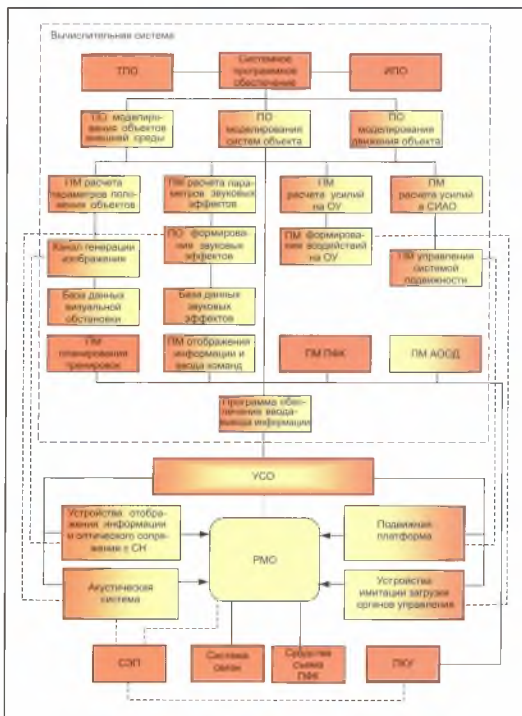


Рис.2.12. Типовая структура тренажера



Рис.3.2. Структура тренажерного комплекса

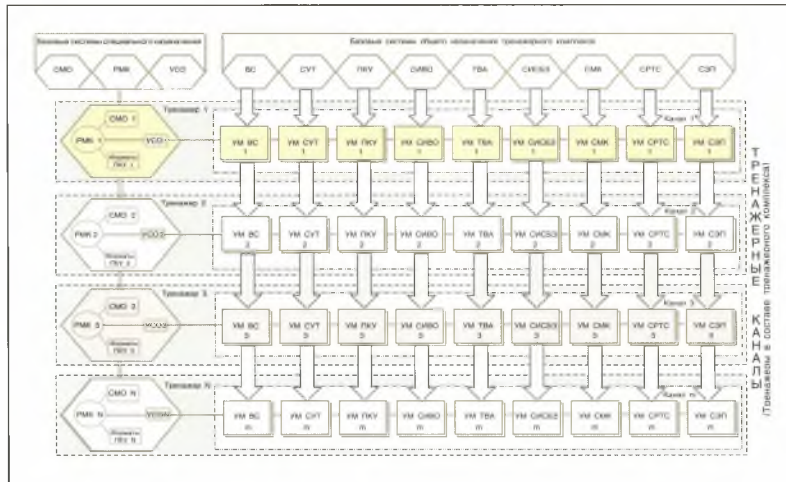


Рис.3.3. Формирование тренажерного канала

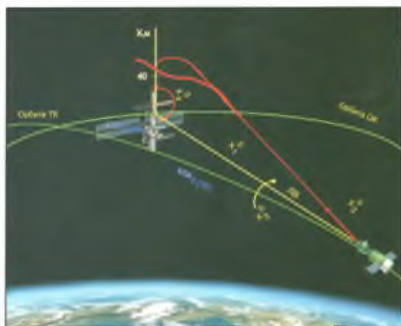


Рис.7.1. Схема сближения космических аппаратов PKA_1 и PKA_2

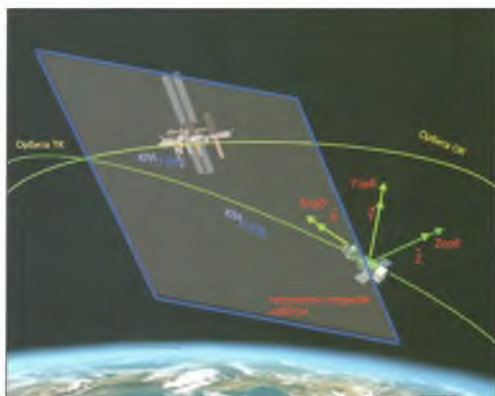


Рис.7.5. Процесс сближения ПКА

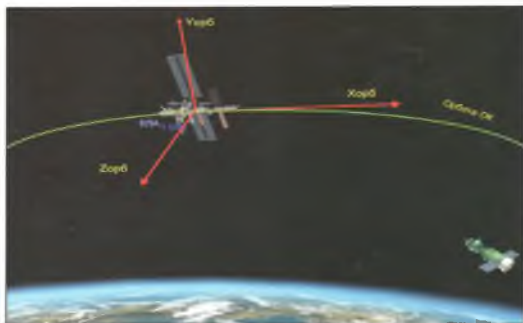


Рис.7.11. Относительное движение ПКА в орбитальной системе координат



Рис.11.4. Многоэтажная подвижная платформа



Рис.11.5. Центрифуга ЦФ-18



**Рис.11.7. Тренировка космонавтов
в самолете-лаборатории
по перемещению
в безопорном пространстве**



Рис.12.3. Пульт контроля и управления тренажера транспортного космического корабля



Рис.12.4. Пульт контроля и управления комплексного тренажера модуля "Заря"



Рис.14.5. Внешний вид виртуальной МКС

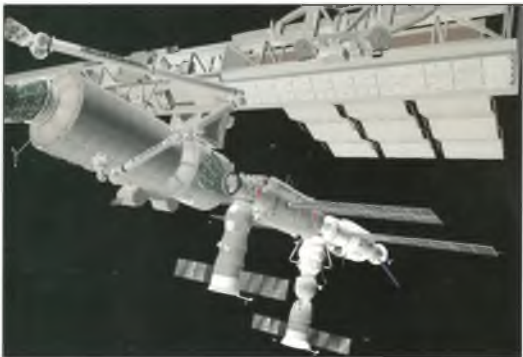


Рис.14.6. Фрагменты внешнего вида виртуальной МКС



Рис.14.7. Виртуальное представление модуля "Заря" МКС в разрезе

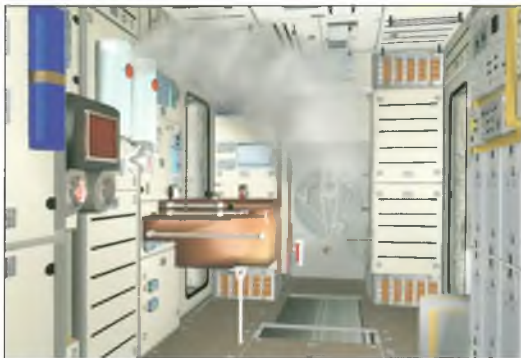


Рис.14.8. Виртуальный рабочий отсек модуля "Звезда" МКС



Рис.15.5. Центр управления полетом



Рис.15.7. Рабочие места космонавтов тренажерного комплекса "Мир"



Рис.15.9. Рабочее место космонавтов
тренажера "Дон-Совет-ТМА"



Рис.15.11. Рабочее место космонавтов
(скафандры в тренажном исполнении)
тренажера "Выход"



Рис.15.13. Рабочее место космонавтов комплексного тренажера модуля "Звезда"



Рис.15.15. Рабочее место космонавтов комплексного тренажера "Заря"



Рис.16.3. Прибор ВКС-4
в режиме "Ориент"



Рис.16.4. Прибор ВКС-4
в режиме "Причал"

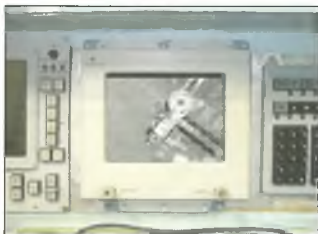


Рис.16.5. Экран дисплея ТОРУ
(узкий угол)



Рис.16.6. Экран дисплея ТОРУ
(широкий угол)



Рис.17.3. Приборы и оборудование рабочего места летчика тренажера "Краб"



Рис.17.6. Трехканальная проекционная система имитации визуальной обстановки