

3. Технические эксперименты и исследования на Российском сегменте МКС. Эксперимент «Альбедо». URL: <http://www.energia.ru/ru/iss/researches/techn/62.html> (дата обращения: 15.05.2013).

References

1. Zhuk E.I., Gutorov A.M., *Nauchnye chteniya pamyati K.E. Tsiolkovskogo* [Scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky], Kaluga, 2009, available at: <http://readings.gmik.ru/lecture/2009-PRIMENENIE-VIRTUALNIH-RUKOVODSTV-PRI-PODGOTOVKE-K-PROVEDENIYU-NAUCHNIH-ISSLEDOVANIY-NA-PILOTIRU->

EMIH-ORBITALNIH-KOMPLEKSAH (accessed 15 May 2013).

2. *Tekhnicheskie eksperimenty i issledovaniya na Rossiiskom segmente MKS. Eksperiment "VIRU"* [Technical experiments and researches on Russian ISS segment. Experiment "VIRU"], available at: <http://www.energia.ru/ru/iss/researches/techn/58.html> (accessed 15 May 2013).

3. *Tekhnicheskie eksperimenty i issledovaniya na Rossiiskom segmente MKS. Eksperiment "Albedo"* [Technical experiments and researches on Russian ISS segment. Experiment "Albedo"], available at: <http://www.energia.ru/ru/iss/researches/techn/62.html> (accessed 15 May 2013).

УДК 004.942, 004.021

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЙСТВИЙ ЭКИПАЖА РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

*Н.М. Орловский, ведущий инженер (Донской филиал Центра тренажеростроения,
Платовский просп., 101, г. Новочеркасск, 346400, Россия, nikolai.orlovski@mail.ru);*

*С.П. Воробьев, к.т.н., доцент (Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт),
ул. Просвещения, 132, г. Новочеркасск, 346428, Россия, vsp1999@yandex.ru)*

Кратко описан процесс планирования полета, являющийся одним из важнейших этапов решения задачи управления космическим полетом. Приведены три стадии планирования полета: стратегическая, тактическая и исполнительная. В свою очередь, исполнительное планирование делится на долгосрочное, краткосрочное и детальное. Продуктом каждой фазы планирования является определенный тип плана: номинальный план полета, общий план сопровождения, детальный план полета. Типы плана отличаются интервалом планирования и глубиной обработки данных. Приводится также последовательность основных действий оператора при включении каждой последующей полетной операции в план. Формальное представление информации, на основе которой формируется план полета, предлагается взять из следующих факторов: списка планируемых полетных операций, состава членов экипажа на борту Международной космической станции, данных о ресурсах. Выполнено математическое представление всех необходимых данных и набора ограничений. В качестве оптимизационного критерия выбрана минимизация простоев экипажа. Для постановки эксперимента использованы два подхода – метод прямого перебора и метод ветвей и границ. Проведен анализ результатов работы алгоритмов и сформулированы выводы о корректности подборки критерия оптимизации и правил ветвления по методу ветвей и границ. Определены дальнейшие задачи в направлении оптимизации процесса планирования действий экипажа.

Ключевые слова: планирование, полетная операция, действия экипажа, оптимизация, математическое моделирование, метод ветвей и границ.

MATHEMATICAL FORMULATION OF ONE-CRITERION OPTIMIZATION PROBLEM OF CREW ACTIONS SCHEDULING ON RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

Orlovsky N.M., leading engineer

(Don Branch of the Space Simulator Center, Platovsky Av., 101, Novocheerkassk, 346400, Russia, nikolai.orlovski@mail.ru);

Vorobyov S.P., Ph.D., associated professor (South-Russian State Technical University

(Novocheerkassk Polytechnic Institute), Prosvesheniya St., 132, Novocheerkassk, 346428, Russia, vsp1999@yandex.ru)

Abstract. The flight scheduling process is briefly described in the article. It is one of the most important stages of space flight control task solution. Three stages of flight scheduling are given: strategic, tactical and executive. The executive scheduling is divided into three phases: long-term, short-term and detailed. The result of each scheduling phase is presented by special plan type: on-orbit operation summary, weekly lookahead plan, short-term plan. The difference of these plan types is in planning interval and data operation depth. The sequence of operator basic actions at placing every next activity into a plan is given. The formal provision of information to create a short-term plan is proposed to take from the following factors: list of planning activities, list of astronauts on the International Space Station (ISS) board, resource data. The mathematical modeling of all required data and restrictions is made. A crew downtime minimization is the selected optimization criterion.

Two approaches are used to set up an experiment: the direct search method and the branch and bound method. An analysis of the algorithms results is made. The conclusions about optimization criterion selection accuracy and ramification rules according to the branch and bound method are formulated. The future tasks regarding crew activities scheduling process optimization are defined.

Keywords: scheduling, flight operation, crew activities, optimization, mathematical modeling, the branch and bound method.

Процесс управления космическим полетом начинается с такого важного этапа, как планирование. Дальнейшие этапы строятся на основе реализации планов и включают осуществление полета, контроль полета, принятие решений по результатам контроля и их выполнение.

Планирование космических полетов делится на стратегическое, тактическое и исполнительное. Стратегическое планирование решает задачу определения основных целей полета, проектных параметров бортовых систем, методов управления *орбитальным комплексом* (ОК) и т.д. На стадии тактического планирования рассчитываются даты стартов транспортных и грузовых кораблей, располагаемые на *Международной космической станции* (МКС) ресурсы и пределы их расхода, перечень научных экспериментов и др. Исполнительное планирование устанавливает конкретные даты, время, последовательность и методы выполнения полетных операций, приводящих к цели, порядок использования различных средств, входящих в состав системы управления полетом.

Длительность периода полета, охваченного тем или иным исполнительным планом, будем называть интервалом планирования. В зависимости от этой величины исполнительное планирование делится на долгосрочное, краткосрочное, детальное. Интервал долгосрочного планирования равен периоду проведения экспедиции, что позволяет определить основные цели для каждой конкретной экспедиции и результаты их выполнения. Продуктом данного вида планирования является *номинальный план полета* (НПП), представляющий собой список всех основных операций. Так как НПП охватывает значительный интервал полета МКС, степень его точности достаточно низкая. Поэтому вводится краткосрочное планирование, для которого выбран интервал в одну неделю. Результатом является *оперативный план полета* (ОПП). Он строится в рамках ранее разработанного НПП с учетом реального состояния ОК. ОПП содержит полный перечень операций, подлежащий выполнению на планируемый период времени, с указанием требуемых ресурсов. Для детального планирования величина интервала составляет одни сутки. На этом этапе происходит привязка полетных операций к определенному моменту времени в сутках. Итогом детального планирования является *детальный план полета* (ДПП) – наиболее подробный руководящий документ. НПП, ОПП и ДПП дополняют друг друга и отличаются глубиной обработки данных и величиной интервала планирования [1].

В процессе разработки планов полета оператор-планировщик решает различного рода задачи, одной из которых является формирование последовательности действий для всех членов экипажа. Оператору для размещения каждой полетной операции требуется выполнить следующие шаги.

1. Выбрать полетную операцию из заявочного списка, поступающего из программы полета, и найти промежуток времени, в рамках которого обеспечиваются допустимые условия ее выполнения. Для этого нужно проанализировать большое количество данных на всем протяжении планируемого интервала, что занимает достаточно много времени и является сложной задачей.

2. Разместить выбранную на предыдущем шаге операцию в подходящем месте и проверить план на отсутствие несовместимостей между работами, а также на соблюдение всех ограничений и правил планирования.

Данные основные задачи решаются оператором при планировании действий экипажа *Российского сегмента* (РС) МКС. Количество полетных операций может составлять несколько сотен единиц, а число космонавтов варьируется от трех до девяти человек. Зачастую встречаются ситуации, когда условия, необходимые для реализации нескольких разнотипных операций, выполняются на одном участке интервала, а доступные ресурсы ОК не обеспечивают возможности их одновременного осуществления. Тогда перед оператором-планировщиком возникает серьезная проблема: какие из конфликтующих операций следует запланировать на данном участке интервала, а какие отложить [2].

Формальное представление информации, на основе которой формируется план полета, может быть выполнено посредством анализа следующих факторов:

- список планируемых полетных операций;
- состав членов экипажа, находящихся на борту РС МКС, которым предстоит выполнять указанные работы;
- данные о затратах всех видов ресурсов, необходимых для реализации каждой заявленной на выполнение полетной операции;
- общий объем каждого вида ресурса, имеющегося в наличии на космической станции.

Заявленный перечень работ, который необходимо включить в план, может быть представлен в виде множества $A = \{a_i\}$, $i = \overline{1, m}$, полетных операций, где i – номер полетной операции; m – количество полетных операций. Элемент множества a_i содержит длительность полетной операции i .

Множество A поступает из программы полета и НПП. Все полетные операции реализуют находящиеся на борту станции участники экспедиции, состоящей из множества $B=\{b_j\}$, $j = \overline{1, n}$, космонавтов (членов экипажа), где j – номер космонавта; n – количество космонавтов. Элемент множества b_j содержит идентификатор космонавта j . Множество B поступает из программы полета. На реализацию каждой полетной операции требуется затратить известное количество различных ресурсов. Эти данные хранятся в матрице $C=\{c_{ri}\}$, $r = \overline{1, R}$, $i = \overline{1, m}$, где r – вид ресурса; R – количество видов ресурса. Элемент матрицы c_{ri} – требуемое количество ресурса r для выполнения полетной операции i . Матрица C поступает из программы полета. Доступное количество всех видов ресурсов на заданный интервал планирования хранится во множестве $Res=\{res_r\}$, $r = \overline{1, R}$. Элемент множества res_r отображает оставшийся на борту объем ресурса r . Множество Res поступает из программы полета. Перед началом составления плана полета оператору требуется список полетных операций, не совместимых по времени и/или ресурсам. Такие полетные операции не могут выполняться различными членами экипажа в один и тот же промежуток времени. Их перечень и признак несовместимости хранятся в матрице $D=\{d_{is}\}$, $i = \overline{1, m}$, $s = \overline{1, m}$, где элемент матрицы

$$d_{is} = \begin{cases} 1, \text{ если полетные операции } i \text{ и } s \text{ несовместимы,} \\ 0, \text{ если полетные операции } i \text{ и } s \text{ совместимы.} \end{cases}$$

Матрица D формируется на основе программы полета и описания полетных процедур.

Для корректного формирования плана необходима следующая информация: условия проведения каждой полетной операции (поступают из программы полета); совокупность ограничений и правил для проведения полета, которые корректируются на протяжении формирования всех видов планов до момента создания оперативных планов с учетом приобретенного опыта и фактического состояния космического аппарата и наземных комплексов управления (НКУ).

Процесс планирования действий экипажа предлагается представить в виде матрицы $P=\{p_{ji}\}$, $j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$, которая задает распределение полетных операций между членами экипажа. Элемент матрицы представляет собой кортеж $p_{ji}=(pp_{ji}, pn_{ji}, pk_{ji})$, где

$$pp_{ji} = \begin{cases} 1, \text{ если член экипажа } j \text{ выполняет} \\ \text{полетную операцию } i, \\ 0, \text{ если не выполняет;} \end{cases}$$

pn_{ji} – время начала выполнения полетной операции; pk_{ji} – время окончания выполнения полетной операции. В процессе расчетов также потребуется множество $F=\{f_i\}$, $i = \overline{1, m}$, которое содержит при-

знак включения или невключения полетной операции в план. Элемент множества

$$f_i = \begin{cases} 1, \text{ если полетная операция } i \\ \text{включена в план,} \\ 0, \text{ если не включена.} \end{cases}$$

Для облегчения труда оператора задачу оптимизации составления расписания действий экипажа можно решить с применением автоматизации. Для формализации задачи необходимо определить критерий, по которому будет выбираться наилучший вариант плана из некоторого набора, и уточнить ограничения, накладываемые на план [3].

Одним из наиболее важных требований при распределении полетных операций между членами экипажа является максимальная загрузка космонавтов, то есть отсутствие простоев между выполнением запланированных действий. Таким образом, оптимизацию процесса планирования действий экипажа предлагается осуществить через минимизацию простоев экипажа:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^m pp_{ji} \cdot a_i}{I_j} \right) \longrightarrow \min, W \in [0; 1], \quad (1)$$

где I_j – интервал функционирования космонавта j в минутах (берется из программы полета); $\sum_{i=1}^m pp_{ji} \cdot a_i$ – длительность выполнения всех полетных операций космонавтом j .

В свою очередь, существует набор ограничений и правил планирования, которым должен удовлетворять план. К ним относятся следующие.

1. Суммарное количество каждого ресурса, используемого всеми запланированными полетными операциями, не должно превышать значения, имеющегося на станции:

$$res_r - \sum_{i=1}^m c_{ri} \cdot \sum_{j=1}^n pp_{ji} \geq 0, r = \overline{1, R}. \quad (2)$$

2. Запланированная полетная операция должна выполняться как минимум одним членом экипажа:

$$\begin{cases} f_i = 0, \sum_{j=1}^n pp_{ji} = f_i, \\ f_i = 1, \sum_{j=1}^n pp_{ji} \geq f_i, \end{cases} \quad i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

3. Член экипажа должен уметь выполнять назначенную ему работу. В матрице $E=\{e_{ji}\}$, $j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$, хранится признак допуска космонавта j к выполнению полетной операции i по результатам тренировок. Элемент матрицы

$$e_{ji} = \begin{cases} 1, \text{ если член экипажа } j \text{ допущен} \\ \text{к выполнению полетной операции } i, \\ 0, \text{ если не допущен.} \end{cases}$$

4. Множество $O=\{o_i\}$, $i = \overline{1, m}$, содержит признак обязательного включения полетной операции i в план. Элемент множества

$$o_i = \begin{cases} 1, \text{ если полетная операция } i \\ \text{непрерывно должна входить в план,} \\ 0, \text{ если она может и не входить в план.} \end{cases}$$

Это полетные операции из группы режима труда и отдыха и других групп в зависимости от главной цели плана (стыковка, внекорабельная деятельность, расстыковка):

$$f_i - o_i \geq 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4)$$

5. Соответствие общей продолжительности работ в плане, выполняемых космонавтом j , величине интервала функционирования этого космонавта:

$$\sum_{i=1}^m pp_{ji} \cdot a_i \leq I_j, \quad j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

6. Отсутствие одновременной реализации нескольких полетных операций одним членом экипажа. Для формирования ограничения следует модифицировать матрицу P в P' следующим образом: для каждого $pp_{ji}=0$ значения pn_{ji} и pk_{ji} приравниваются к ближайшему слева $pk_{ji-1, \dots, n-1}$, у которого $pp_{ji-1, \dots, n-1}=1$. Получается, что теперь $pn'_{ji}=pk'_{ji} \neq 0$, а общая продолжительность работы $pk'_{ji}-pn'_{ji}=0$:

$$\forall j = \overline{1, n}, \text{ где } pp'_{ji} = 1 \rightarrow \begin{cases} pn'_{ji} - pk'_{jl} \geq 0, \\ pk'_{ji} - pn'_{jl} \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad l = \overline{1, m}, \quad l \neq i.$$

7. Отсутствие одновременного выполнения несовместимых работ в плане:

$$\forall d_{is} = 1, \text{ причем } f_i = f_s = 1 \rightarrow \begin{cases} pn_{ji} - pk_{is} \geq 0, \\ pk_{ji} - pn_{is} \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, m}, \quad s \neq i; \quad j = \overline{1, n}; \quad u = \overline{1, n}, \quad u \neq j.$$

Необходимо также обеспечить соответствие норм режима труда и отдыха в плане и выполнение всех необходимых условий для проведения каждой включенной в план полетной операции.

План, удовлетворяющий всем перечисленным ограничениям, считается допустимым, но в нем не учитывается требование максимально эффективного использования рабочего времени членами экипажа. Для оптимизации процесса планирования исследованы два метода поиска наилучшего плана с использованием предложенного выше критерия: метод прямого перебора и метод ветвей и границ [4].

Прямой перебор использован как точный метод для проверки и подтверждения корректности применения предложенного алгоритма ветвей и границ.

Прямой перебор для данной постановки задачи представляет собой рассматриваемую в комбинаторике задачу размещения без повторений. Количество размещений при $m=k$ составляет $A_m^k = m!$ вариантов, поэтому уже для $m=10$ полетных опе-

раций в заявочном списке существует более трех миллионов комбинаций.

Метод ветвей и границ позволяет получать оптимальный план за счет отсечения заранее известных, не приводящих к лучшему значению вершин. Блок-схема алгоритма работы метода ветвей и границ, примененного к данной постановке задачи планирования действий экипажа, представлена на рисунке.

В указанных алгоритмах приняты следующие ограничения:

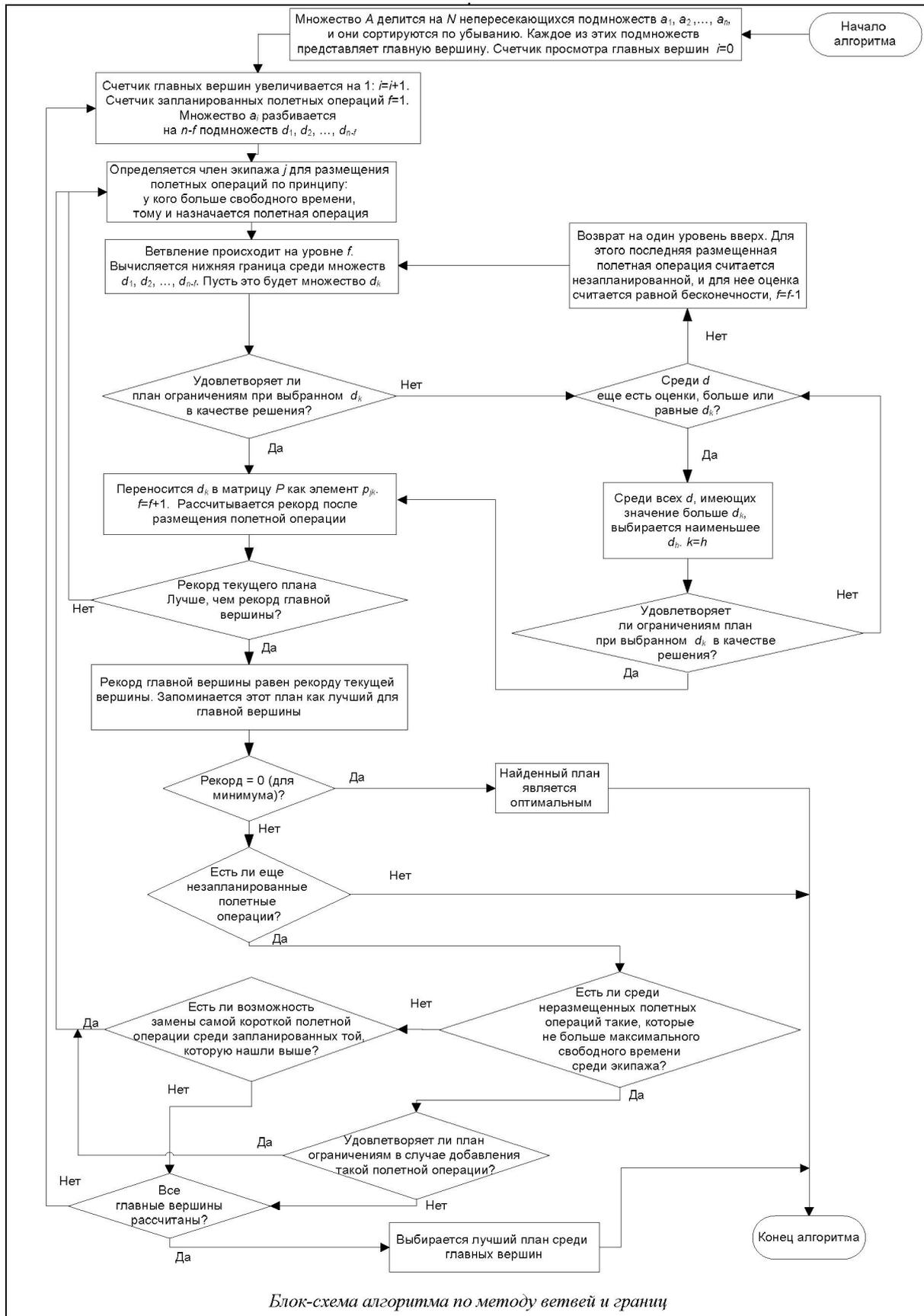
- суммарное количество каждого ресурса, используемого всеми запланированными полетными операциями, не должно превышать значение, имеющееся на станции;
- соответствие общей продолжительности работ в плане, выполняемых каждым космонавтом, величине интервала функционирования этого космонавта.

В таблице приведены результаты сравнения времени работы алгоритмов до нахождения оптимального значения при использовании вышеуказанных методов для разного уровня сложности (размерности) задачи. В качестве исходных данных для всех экспериментов использовалась одна и та же детерминированная последовательность полетных операций.

№	Количество		Время работы алгоритма, сек.		Интервал планирования, мин.
	полетных операций	членов экипажа	Прямой перебор	Метод ветвей и границ	
1	9	2	0,210	0,190	50
2	10	2	0,677	0,137	50
3	11	2	4,109	0,132	50
4	11	2	0,268	0,168	60
5	12	2	1,067	0,227	60
6	13	2	0,487	0,194	60
7	8	3	1,512	0,386	40
8	9	3	1,699	0,193	40
9	10	3	0,327	0,188	40
10	11	3	1226,31	2,719	60

Оба метода дают возможность достигать оптимального качества плана за различное время. Метод ветвей и границ в полной мере удовлетворяет требованию минимизации простоев для всех вариантов тестирования и почти в каждом случае требует на это менее 0,5 сек. Лишь последний тест занял 2,7 сек., что в 451 раз быстрее по сравнению с прямым перебором (1226,31 сек.).

Таким образом, на основе полученных данных работы алгоритмов можно сделать вывод о корректности выбора критерия оптимизации, правил и очередности ветвления метода ветвей и границ. В целях дальнейшего повышения качества расписания действий экипажа планируется провести



Блок-схема алгоритма по методу ветвей и границ

исследование возможности и эффективности применения при решении данной задачи методов

многокритериальной оптимизации и использование модифицированных генетических алгоритмов.

Литература

1. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. Ч. I. 476 с.
2. Станиловская В.И. Автоматизация планирования полетов долговременных орбитальных комплексов: дис... канд. технич. наук. Королев, 2008. 198 с.
3. Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. 142 с.
4. Гончаров Е.Н., Ерзин А.И., Залобовский В.В. Исследование операций. Примеры и задачи: учеб. пособие. Новосибирск: НГУ, 2005. 78 с.

References

1. Solovyov V.A., Lysenko L.N., Lyubinsky V.E., *Upravlenie kosmicheskimi polyotami* [Spaceflights control], Part 1, Moscow, BMSTU, 2009.
2. Stanilovskaya V.I., *Avtomatizatsiya planirovaniya polyotov dolgovremennykh orbitalnykh kompleksov* [Flights Scheduling Automation for Long-Term Orbital Complexes], PhD dissertation, Korolyov, 2008.
3. Bakhvalov Yu.A., *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], Novocherkassk, YuRGTU(NPI), 2010.
4. Goncharov E.N., Erzin A.I., Zalyubovsky V.V., *Issledovanie operatsy. Primery i zadachi* [Operations Research. Examples and exercises], Novosibirsk, NGU, 2005.

УДК 004.942

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНА ПОЛЕТА

*Н.М. Орловский, ведущий инженер (Донской филиал центра тренажеростроения,
Платовский просп., 101, г. Новочеркасск, 346400, Россия, nikolai.orlovski@mail.ru);
А.М. Беляев, зам. начальника отдела (Ракетно-космическая корпорация «Энергия»,
ул. Ленина, 4а, г. Королев, 141070, Россия, andrey.belyaev@sfoc.ru)*

В основе успешного выполнения задач по управлению космическим полетом лежит высокопрофессиональное планирование полетов. Среди всех документов этого этапа наиболее важными являются номинальный план полета, общий план сопровождения и детальный план полета, отличающиеся интервалом планирования и степенью точности данных. Основной структурой каждого плана является полетная операция. Оператор должен проанализировать большое количество данных, чтобы найти подходящее место для ее размещения внутри рассматриваемого интервала. Автоматизация этого процесса на основе нескольких критериев может освободить планировщика для решения других задач. Первый критерий – максимальное использование свободного времени экипажа, который является одним из главных ресурсов на борту орбитального комплекса. Второй критерий можно сформулировать как оценку общего уровня компетенции членов экипажа в выполнении назначенных им полетных операций. Третий критерий – распределение в плане прежде всего тех полетных операций, которые необходимо выполнить в первую очередь согласно целям, требованиям и правилам планирования. В статье дается математическое представление указанных критериев и ограничений планирования. Разработана математическая интерпретация последовательности расчета переменного приоритета полетной операции. Таким образом, следующим этапом является разработка генетического алгоритма на основе предложенной математической постановки многокритериальной задачи оптимизации действий экипажа.

Ключевые слова: планирование, многокритериальная оптимизация, полетная операция, действия экипажа, математическое моделирование, приоритет, эффективность.

MATHEMATICAL FORMULATION FOR MULTICRITERION PROBLEM OF FLIGHT PLAN OPTIMIZATION

*Orlovsky N.M., leading engineer (Don Branch of the Space Simulator Center,
Platovsky Av., 101, Novocherkassk, 346400, Russia, nikolai.orlovski@mail.ru);
Belyaev A.M., deputy head of department (RSC «Energia»,
Lenina St., 4a, Korolev, 141070, Russia, andrey.belyaev@sfoc.ru)*

Abstract. The stage of highly skilled flight scheduling is the ground for space flight control successful tasks fulfillment. There are only three most important documents among others on this stage: on-orbit operation summary, weekly look-ahead plan, short-term plan. Mentioned plans are different in planning interval and data level accuracy. The major structure of every plan type is the flight operation. The operator ought to analyze a large amount of information to find a suitable location for flight operation in interval under consideration. The multiple criteria automation of this process could release a scheduler to solve other tasks. The first criterion is using crew spare time, a crew is one of the major resources on the orbit complex. The second criterion is an evaluation of crew general level of competence for performance of all scheduling activities. The third criterion is ranking the most urgency and important flight operations in the plan to accomplish them in the first place. Mathematical representation of mentioned criteria and scheduling restrictions is done. A mathematical interpretation of calculating sequencing for variable priority of activity is designed. Thus, the next stage is the elaboration of genetic algorithm based on the suggested mathematical formulation for multiple criteria problem of crew activity optimization.

Keywords: scheduling, multiple criteria optimization, flight operation, crew activities, mathematical modeling, priority, efficiency.