К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ ДЛЯ РАБОТЫ НА МКС

С.В. Бронников⁵, А.Р. Герасимов^{1,3}, А.А. Лазарев^{1,2,3,4}, Е.Г. Мусатова¹,
А.С. Петров^{1,4}, К.В. Пономарев⁶, М.М. Харламов⁶, Н.Ф. Хуснуллин¹,
Д.А. Ядренцев⁶,

¹Институт проблем управления РАН, Москва, Россия;

²Московский государственный университет, Москва, Россия;

³Московский физико-технический институт, Москва, Россия;

⁴МЛАВР, Высшая школа экономики, Москва, Россия;

⁵Ракетно-космическая корпорация «Энергия», Москва, Россия;

⁶Центр подготовки космонавтов, Звездный городок, Россия.

В работе рассматривается задача планирования подготовки космонавтов к космическим полетам. Предлагается математическая модель в виде задачи целочисленного линейного программирования. Приводятся результаты численных экспериментов на реальных данных.

Введение

Подготовка космонавтов – очень длительный, дорогостоящий и технически сложный процесс, включающий в себя комплекс мероприятий, направленных на формирование и поддержание у космонавтов совокупности определенных знаний, навыков и умений, необходимых для надежного и безопасного выполнения программы космического полета. Необходимо подготовить космонавтов к штатным и нештатным ситуациям, которые могут возникнуть во время полета. Для обеспечения поставленной цели используется целый спектр комплексных и специализированных тренажеров пилотируемого корабля "Союз" и российского сегмента Международной космической станции (МКС). В распоряжении Центра подготовки космонавтов имеются центрифуги, гидролаборатория, барокамера, сурдокамера, термокамера, функционируют летающие лаборатории [1, 2, 4, 5].

Весь процесс подготовки делится на несколько этапов, последний из которых – подготовки космонавтов для работы на МКС. В статье рассматривается подготовка экипажа из 3 человек с горизонтом планирования 2,5 года.

Постановка задачи

Введем следующие обозначения:

I – множество космонавтов экипажа, в частности, в данной задаче $I = \{1, 2, 3\}$;

J – множество этапов подготовки (занятий) экипажа;

J_i^T – множество занятий по технической подготовке космонавта i .

На данный момент – это все занятия кроме языковой и физической подготовок;

J_i^F – множество занятий физической подготовки космонавта i , каждое продолжительностью 2 часа;

J_i^A – множество административных обязанностей космонавта i ;

J_i^L – множество занятий языковой подготовки космонавта i , каждое продолжительностью 2 часа;

J_i – множество занятий космонавта i , $J_i = J_i^T \cup J_i^F \cup J_i^A \cup J_i^L$;

p_j – время выполнения операции $j \in J$;

$R = \{1, 2, \dots, |R|\}$ – множество ресурсов;

rc_{jr} – количество ресурса $r \in R$, требуемое для операции $j \in J$;

ra_{wdh} – количество ресурса $r \in R$, доступное в неделю w , в день d , в интервал h ;

$G = (J, L)$ – граф отношений предшествования между этапами подготовки. Если $(j_1, j_2) \in G$, то этап j_1 выполняется раньше, чем этап j_2 .

W – множество недель горизонта планирования, $W = \{1, \dots, \omega\}$, где ω – количество рассматриваемых недель, $w \in W$;

D – множество дней в неделю, $D = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $d \in D$;

H – множество временных интервалов в день, $H = \{1, \dots, 18\}$, $h \in H$;

Y – множество всех троек (w, d, h) , $Y = \{(w, d, h) \mid w \in W, d \in D, h \in H\}$.

Согласно принятой на практике терминологии, занятия объединены в бортовые комплексы (БК), другими словами, это логическое разделение проводимых занятий по темам. Как правило, каждый БК заканчивается экзаменом или зачетом и существует ряд ограничений по их проведению [6].

Пусть J_i^B – множество групп операций (занятий), составляющие БК $J_i^{B_1}, J_i^{B_2}, \dots, J_i^{B_{m_i}}$, где m_i – количество БК, которые должен изучить космонавт i .

Введем булеву переменную x_{jwdh} , которая равна 1 тогда и только тогда, когда в неделю w , в день d , в интервал h происходит подготовка по этапу $j \in J$. В противном случае переменная равна 0.

В каждый интервал времени должно быть достаточно ресурсов для проведения занятий:

$$\sum_{j \in J} rc_{jr} \sum_{h \in \{h-p_j+1, \dots, h\}} x_{jwdh} \leq ra_{rwdh}, \quad \forall r \in R, \forall (w, d, h) \in Y. \quad (1)$$

Каждый космонавт должен пройти все этапы в необходимом объеме:

$$\sum_{(w, d, h) \in Y} x_{jwdh} = 1, \quad \forall j \in J. \quad (2)$$

Все занятия должны быть закончены до конца рабочего дня:

$$\sum_{w \in W} \sum_{d \in D} \sum_h^{\gamma-h+p_j-1} x_{jwdh} = 1, \quad \forall j \in J, h \in H, \quad (3)$$

где γ – количество интервалов в день.

Если операция j_1 должна быть выполнена раньше j_2 , то ограничение отношения предшествования записывается следующим образом:

$$\sum_{(w, d, h) \in Y} t(w, d, h) x_{j_2wdh} - \sum_{(w, d, h) \in Y} t(w, d, h) x_{j_1wdh} \leq p_j, \quad \forall (j_1, j_2) \in G, \quad (4)$$

$$t(w, d, h) = (w-1) \cdot |D| \cdot |H| + (d-1) \cdot |H| + h,$$

где $|D|$ – количество дней в неделю, $|H|$ – количество временных интервалов в день.

В неделю у каждого космонавта должно быть не более 4 часов физической подготовки (2 занятия по 2 часа):

$$\sum_{j \in J_i^f} \sum_{d \in D} \sum_{h \in H} x_{jwdh} \leq 2, \quad \forall i \in I, \forall w \in W. \quad (5)$$

В день у каждого космонавта не может быть больше 1 занятия по физкультуре:

$$\sum_{j \in J_i^f} \sum_{h \in H} x_{jwdh} \leq 1, \quad \forall i \in I, \forall w \in W, \forall d \in D. \quad (6)$$

Аналогичным образом записываются ограничения для языковой подготовки и административные обязанности. Кроме этого, существуют ограничения на обед и одновременное проведение занятий для нескольких космонавтов.

На данный момент ставится задача получение допустимого расписания, удовлетворяющего описанным выше ограничениям (1) – (6). Тем не менее, могут быть предложены некоторые варианты целевых функций, например, минимизация продолжительности подготовки экипажа [3].

Апробация результатов

Для сотрудников лаборатории доступна академическая версия пакета IBM ILOG Cplex, пакет программного обеспечения (решатель), предназначенный для решения задач линейного и квадратичного программи-

рования, в том числе целочисленного. Именно на нем был реализован алгоритм математического ядра системы с использованием метода ветвей и границ с отсечениями, настройки которого были выбраны по умолчанию.

Так как для математического ядра необходимы преобработанные данные, в частности, необходимо строить граф предшествования на основе учебного плана каждого из космонавтов, основываясь на правилах, продиктованных заказчиком, было написано веб приложение на языке Python, в котором данные хранились в базе данных (БД) Postgre SQL. Кроме этого, БД была точкой обмена данными между всеми компонентами системами. В момент запуска математического ядра пакет IBM ILOG Cplex извлекал из БД исходные данные задачи и в последствии отправлял результат обратно.

Так как полученные данные необходимо анализировать на корректность и демонстрировать заказчику, была написана утилита на языке C#, которая преобразует результирующую матрицу математического ядра, основываясь на исходных данных задачи (учебного плана космонавтов), в табличный формат Excel.

В рамках исследования были проведены вычислительные эксперименты с исходными данными, предоставленные Центром подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. Были рассмотрены 18 БК, относящиеся к подготовке по транспортному пилотируемому кораблю «Союз» с горизонтом планирования около 19 недель.

Получить решение задачи для всего горизонта планирования на описываемой архитектуре не удалось из-за высокой размерности задачи. В связи с этим было проведено разбиение исходных данных на 6 независимых учебных сессий, каждая из которых в среднем была посчитана за 2 минуты (таблица 1). Таким образом удалось найти приемлемое решение для поставленной задачи с горизонтом планирования в 20 недель.

Таблица 1

Результаты численного тестирования

Номер сессии	Время счета, мин	Количество				
		недель	занятий	переменных, тыс	Ограничений, тыс	Итераций, тыс
1	0,30	3	141	38	42	2
2	1,51	5	237	106	114	838
3	0,37	5	211	95	110	232
4	3,56	5	235	105	110	2 689
5	0,03	1	27	2	5	0
6	0,06	1	33	3	5	0

Заключение

В статье описаны основные моменты планирования подготовки космонавтов. Предложен метод решения задачи планирования подготовки, основанный на целочисленном линейном программировании. В дальнейшем планируется переписать математическое ядро, основываясь на парадигме «программирование в ограничениях» (Constraint Programming). Данная работа является неотъемлемой частью разработки автоматизированного рабочего места (АРМ), которое призвано сократить сроки осуществления планирования и снизить количество рутинных операций при построении расписания подготовки экипажей для полета и работе на МКС. Также будут учитываться изменения в исходных данных, которые возникают в результате практической подготовки экипажей к полетам.

Работа над созданием АРМ еще не завершена и на данный момент преждевременно проводить сравнение с расписанием, которое строит диспетчер.

Список литературы

1. Беляев А.М., Будникова Т.С., Козлечков А.Г., Колокольцева О.М., Потоцкий С.И., Станиловская В.И. Автоматизированная система планирования полета российского сегмента международной космической станции // Программы и продукты. – 2013. - №3. – с.48-54.
2. Бронников С.В., Разработка требований к подготовке экипажей космической станции // Космическая техника и технологии. – 2015. – №1(8). – с.81-87.
3. Бронников С.В., Долгий А.Б., Лазарев А.А., Морозов Н.Ю., Петров А.С., Садыков Р.Р., Сологуб А.А., Werner F., Ядренцев Д.А., Мусатова Е.Г., Хуснуллин Н.Ф., Approaches for planning the ISS cosmonaut training // Preprint Nr. 12. Magdeburg: Institut fur Mathematische Optimierung. – 2015. – 33 p.
4. Станиловская В.И., Автоматизация планирования полетов долговременных орбитальных комплексов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2008.
5. Орловский Н.М., Математические модели и алгоритмы автоматизированной системы планирования работы экипажа // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2015.
6. Курицын А.А., Харламов М.М., Автоматизация управления технологическим процессом комплексной подготовки экипажей орбитальных пилотируемых комплексов // Пилотируемые полёты в космос. No 1(1), 2011. С. 87–94.