

# ОБЗОР МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДГОТОВКИ АВИАЦИОННЫХ ЭКИПАЖЕЙ

Гусев С.С.

*Российская Федерация, г. Москва,  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

**Аннотация.** Целью настоящей работы является автоматизация процесса и уменьшение количества трудозатрат, повышение оперативности и снижение рутинных операций при составлении расписаний подготовки экипажей по сравнению с существующими подходами. Научная и практическая значимость данной работы заключается в перспективности использования разработанных математических моделей и алгоритмов для автоматизации процесса составления расписаний подготовки экипажей. Выделяя стратегические и тактические уровни планирования, удалось уменьшить время, необходимое на построение расписаний. Улучшено качество планирования за счет увеличения объема учитываемой информации, числа рассматриваемых вариантов расписаний и введения целевых функций. Увеличена гибкость и оперативность адаптивного планирования, предоставлена возможность тщательной проверки элементов расписания на совместимость, обеспеченность ресурсами, выполнимости различного рода ограничений. Внедрение системы позволит сократить часть ручного труда и повысит оперативность в решении комбинаторных задач распределения ресурсов необходимых для проведения занятий.

**Ключевые слова:** центр подготовки космонавтов, математические модели, экипажи, процесс составления расписаний, проведение занятий.

## 1. Введение

Успешное и эффективное достижение целей наземной, воздушной или космической экспедиции во многом зависит от слаженных и своевременных действий членов экипажа. В зависимости от назначения это может быть экипаж военного самолета, танка или Международной космической станция. Центрами подготовок экипажей специального назначения являются летные и танковые училища, а также Центр подготовки космонавтов (ЦПК) им. Ю.А. Гагарина. Указанные центры представляют из себя социально-экономические системы, взаимодействие членов и совокупность процессов которых способно обеспечить требуемый уровень компетенции, необходимое качество работы и слаженность всех членов экипажа во всех штатных и аварийных ситуациях. Одной из основных задач, рассматриваемых организационных систем, является планиро-

вание подготовки на тренажерах, организация занятия со специалистами для формирования и поддержания у членов экипажей совокупности определенных знаний, навыков и умений, необходимых для надежного и безопасного выполнения поставленной задачи или программы космического полета.

В работе рассматриваются задачи стратегического и тактического календарного планирования подготовки экипажей. Созданы математические модели в виде задач целочисленного линейного программирования и программирования в ограничениях. Разработаны эвристические алгоритмы на основе правил приоритета и на основе генетического алгоритма (ГА) для решения задачи минимизации взвешенной суммы продолжительности изучения каждого из курсов подготовки. На основе вычислительных экспериментов на более чем 2500 различных наборах данных выполнена проверка эффективности разработанных математических моделей и алгоритмов. Приведено сравнение различных подходов к решению задачи на реальных данных.

## **2. Постановка задачи**

Опишем основные ограничения, накладываемые на расписания подготовки экипажей специального назначения. Рабочий день обычно начинается в 9:00 и заканчивается в 18:00. Для большинства занятий справедливо условие: они должны закончиться до конца рабочего дня. Минимальная длительность занятия может быть 30 минут, в связи с этим предлагается принять в качестве единицы времени получасовой интервал. Однако существуют такие занятия, которые длятся несколько дней. Например, у некоторых подразделений существует тренировка по выживанию в зимнем лесу или в лесисто-болотистой местности продолжительностью 3 суток. Этот вид экстремальной подготовки связан с возможностью приземления в незапланированном районе и требованием к экипажу быть подготовленными к подобным ситуациям.

Таким образом, модель должна предоставлять возможность устанавливать множество получасовых интервалов в рабочий день для ситуаций, когда занятия должны закончиться до конца рабочего дня, и быть гибкой для предоставления возможности планировать многодневные тренировки.

Множество занятий, которые объединены общей темой, освоением определенного типа оборудования, будем называть бортовым комплексом (БК).

Согласно проведенным исследованиям и принятым нормам при подготовке существуют такие БК, материал которых нельзя изучать более, например, 4 часов в день. Также не рекомендуется каждому инструктору ставить занятий больше, чем на 6 часов в день, поскольку в связи со спецификой работы после этого промежутка времени резко падает производительность и качество подготовки. Для поддержания физического состояния и учитывая необходимость работать с зарубежными партнерами, для каждого члена экипажа на протяжении всей подготовки необходимо запланировать по несколько занятий физической подготовки и по несколько занятий английского языка в неделю. При этом, принимая во внимание физиологические особенности, нельзя проводить занятия с большой физической нагрузкой после приема пищи.

### **3. Точные методы решения**

Точные (детерминированные) методы решения позволяют найти точное решение задачи за конечное число операций. Большой вклад в создание, развитие и исследование точных методов решения был внесен следующими представителями: Р. Вуккер, Р.Е. Беллман, А.Н. Ланд, В.С. Танаевым, М.Я. Ковалевым, В.В. Шкурбой, Ю.С. Федосенко и многими другими.

Метод ветвей и границ (В&В).

Впервые подход был предложен группой авторов: А.Н. Ланд и А.Г. Доиг [1]. Представляет собой общий метод для нахождения оптимальных решений различных задач оптимизации. Метод позволяет ускорить процесс поиска за счет отбрасывания подмножества заведомо неоптимальных решений, следствием чего является сокращение времени работы метода.

Существуют следующие основные элементы В&В:

– ветвление – исходная задача разбивается на подзадачи (ветви), в свою очередь каждая подзадача является базисом для другого ветвления, образуя дерево поиска;

– верхняя и нижняя границы – некоторая оценка подзадачи, основанная на значении целевой функции. Используется для предварительной оценки перспективности той или иной подзадачи (ветви). Другими словами, позволяет оценить возможность того, что подзадача содержит оптимальное решение исходной задачи тем самым сократить размерность решаемой задачи.

Достоинством подхода является простота и наглядность представления решения задачи. Применяя метод относительно несложно смоделировать исходную проблему при помощи, например, инструмента IBM ILOG CPLEX. Главный недостаток В&В заключается в необходимости полностью решать задачи линейного программирования (ЛП), ассоциированные с каждой из вершин допустимых решений. Для задач большой размерности это требует значительных и, в некоторой степени, неоправданных с практической точки зрения затрат времени. Несмотря на отмеченные недостатки данного метода, в настоящее время алгоритмы метода являются надежным средством решения задач целочисленного программирования, встречающихся в практических исследованиях. В работе М.А. Посыпкина исследован вопрос решения задачи большой размерности методом ветвей и границ на распределенном кластере. В работе также показано, что не любая целочисленная задача может быть решена с помощью В&В.

Динамическое программирование. Способ решения сложных задач путём разбиения их на более простые подзадачи. Ключевая идея в декомпозиции задачи на подзадачи – решить каждую из них один раз, после чего объединить решения подзадач в одно общее решение. Это особенно полезно в случаях, когда число подзадач экспоненциально велико. Однако, это является основным ограничением данного метода, в том случае, когда приходится хранить результаты оптимизации всех этапов. Соответственно при увеличении числа ограничений задачи экспоненциально увеличивается объем необходимой памяти.

#### **4. Анализ используемых методов решения проблем планирования в космической отрасли**

Далее будут перечислены некоторые работы по решению задач планирования в космической отрасли. Обзор детерминированных, вероятностных и нечетких моделей сделан в [1]. В работе рассмотрены базовые алгоритмы построения детальных планов полетов и ряд методов планирования работ на МКС, которые используются на практике в Центре управления полетами (ЦУП) в г. Королёв, даны оценки их применимости. Кроме того, автором приведено описание методологии взаимодействия разных центров управления полетами в ходе выполнения международных программ. Представлены положения для разработки автоматизированной системы планирования работ на МКС с классификацией полетных операций и их формализация в базе данных.

В работе [2] предложен подход к адаптивному планированию полётных операций на основе мультиагентных систем. Подход позволяет формировать резервные планы, прогнозировать расход воды, топлива и пищи на МКС. Также осуществляется контроль за наличием лишнего или недостающего оборудования. В [3] описана разработка мультиагентной системы интерактивной доводки планов полётных операций.

В работе [4] представлен генетический алгоритм распределения операций между группами космонавтов и формирования расписаний действий экипажа на борту МКС для достижения поставленных целей экспедиции.

В американском национальном управлении по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA) в 2009 году была внедрена система STAR для организации обучения экипажа, инструкторов и специалистов по управлению полетами, позволяющая обеспечивать интегрированную разработку учебного плана, составлять отчетность, строить расписания для персонала и оборудования, а также осуществлять обратную связь после учебных мероприятий для оптимизации учебных планов.

Для формирования расписания работы марсохода в Исследовательском центре NASA использовались методы программирования в ограничениях (Constraint Programming).

В Европейском космическом агентстве применяется несколько различных подходов для планирования операций в зависимости от вида задачи. При помощи одного из точных методов программирования в ограничениях формируется базовое расписание, удовлетворяющее основным ограничениям. Методы локального поиска (метод покоординатного спуска, поиск с запретами, метод имитации отжига, генетические алгоритмы) используются для оптимизации локальных критериев и выполнения специфических условий.

В работе [4] описана возможность применения системы PERT на примере Европейского Космического Агентства для формирования долгосрочного расписания подготовки космонавтов. Метод обеспечивает оценку и анализ времени выполнения, трудозатрат и потребности в других ресурсах проекта на основе соответствующих характеристик и зависимостей входящих в него задач. Данный подход относится к вероятностным методам. Самой популярной частью PERT является метод критического пути, опирающийся на построение сетевого графика (сетевой диаграммы PERT). Данный подход был успешно применен для планирования 2 млн. заданий на проекте американского космического агентства «Аполлон» для подготовки к отправке астронавтов на поверхность Луны.

Обычно при осуществлении научных исследований и разработок заранее неизвестно время, необходимое для выполнения различных работ. Поэтому при использовании PERT учитывается неопределенность в задании продолжительности работ. Метод позволяет определить вероятность завершения различных этапов проекта в заданный срок, а также вычислить ожидаемую продолжительность проекта. Важным и исключительно полезным результатом применения PERT является определение узких мест проекта. Иначе говоря, выявляются те работы, которые с большей вероятностью способны вызвать задержку сроков завершения проекта. Таким образом, еще до начала работ руководитель проекта

знает, где могут ожидаться задержки. Можно отметить ряд особенностей метода PERT:

– следует применять только для крупных проектов с большим количеством работ (более 300);

– необходимо подобрать экспертов и организовать их работу для получения оценок оптимистичной, пессимистичной и наиболее вероятной продолжительностей для каждой работы проекта, от качества подбора экспертов будет зависеть качество применения метода;

– метод занижает оценку продолжительности проекта, чем больше параллельно идущих работ, тем серьезней ошибка, и для ее устранения часто прибегают к методу Монте-Карло.

Основное отличие PERT от метода критического пути заключается в том, что продолжительности работ считаются случайными величинами. Другими словами, PERT позволяет учесть неопределенность реальных продолжительностей выполнения работ проекта для оценки и анализа сроков его выполнения.

## **5. Заключение**

В завершении весь экипаж сдает государственный экзамен, по результатам которого решается вопрос о допуске к полету. Принимает экзамен Государственная комиссия, состоящая из ведущих специалистов Центра подготовки космонавтов и предприятий, производящих космическую технику. Процесс сдачи экзамена Госкомиссии ничем не отличается от тренировок по сложности и условиям проведения.

## **Список литературы**

1. Pritsker A.A., Watters L.J., Wolfe P.M. Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach // *Management Science*. 1969. № 16.

2. Кузьмин В.В., Новиков А.Л., Полников А.С. Результаты внедрения интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российской Системы МКС // *Материалы XX Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва*. 2014. С. 10-14.

3. Подход к адаптивному планированию полетных операций российского сегмента международной космической станции на основе мультиагентных технологий / В.И. Станиловская, А.М. Беляев, О.И. Лахин и др. // *Проблемы*

управления и моделирования в сложных системах. 2015. С. 147-157.

4. Spagnulo M., Fleeter R., Balduccini M., Nasini F. Space Program Management: Methods and Tools. Springer-Verlag New York, 2013. 352 с.

**REVIEW OF MODELS, METHODS AND ALGORITHMS  
OF MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL SYSTEM OF AIRCRAFT CREW TRAINING**

**S.S. Gusev**

*V. A. Trapeznikov Institute of control sciences of RAS, Moscow, Russian Federation*

**Abstract:** The purpose of this work is to automate the process and reduce the number of labor costs, increase efficiency and reduce routine operations in the preparation of crew training schedules in comparison with existing approaches.

The scientific and practical significance of this work lies in the prospects of using the developed mathematical models and algorithms to automate the process of scheduling crew training. Highlighting the strategic and tactical levels of planning, it was possible to reduce the time required to build schedules. The quality of planning has been improved by increasing the amount of information taken into account, the number of schedules considered and the introduction of targeted functions. Increased flexibility and efficiency of adaptive planning, the opportunity to thoroughly check the schedule elements for compatibility, availability of resources, feasibility of various restrictions. The introduction of the system will reduce the part of manual labor and increase efficiency in solving combinatorial problems of allocation of resources necessary for training.

**Keywords:** cosmonaut training center, mathematical models, crews, scheduling process, conducting classes.