

УДК 658.512.6

## **ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ПОЛЕТА И ГРУЗОПОТОКА РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

***О.И. Лахин***

Научно-производственная компания «Разумные решения»  
Россия, 443013, г. Самара, ул. Московское шоссе, 17 (ТОЦ «Вертикаль»), оф. 1201

*Рассматриваются особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока российского сегмента международной космической станции. Описываются критерии, правила и ограничения, влияющие на планирование программы полета и грузопотока. Показывается с помощью формализованного подхода, как для решения поставленной задачи находится динамический баланс интересов кораблей, модулей и бортовых систем российского сегмента международной космической станции, полетов и грузов, что предполагает взаимно согласованный учет целого ряда индивидуальных особенностей доставляемых грузов, кораблей, модулей и бортовых систем российского сегмента международной космической станции. Обосновывается вывод, что для решения поставленной задачи становится целесообразным применение мультиагентных технологий, предметных онтологий и сетецентрического подхода, позволяющих создавать гибкие самоорганизующиеся программы полета и планы грузопотока.*

***Ключевые слова:*** российский сегмент международной космической станции, программа полета, планирование грузопотока, мультиагентные технологии, частные критерии оптимизации, правила и ограничения планирования, предметные онтологии, сетецентрический подход.

Процесс управления космическим полетом международной космической станции (МКС), которая представляет собой сложный, уникальный, инновационный научно-технический и инженерный орбитальный комплекс большой размерности, начинается с важного этапа планирования. Планирование космических полетов делится на стратегическое (временной интервал – несколько лет), тактическое (временной интервал – около года) и исполнительное (временной интервал – от полугода (номинальный план полета) до суток (детальный план полета)) [1].

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 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.

Поддержание жизнедеятельности МКС и ее эффективное функционирование с учетом необходимости обеспечения существующей замкнутой системы жизне-

---

*Олег Иванович Лахин, руководитель направления.*

обеспечения напрямую зависит от успешного решения задачи формирования программы полетов, построения плана грузопотока на основе расчетов более чем 3500 наименований ресурсов. Решение данной задачи состоит из ряда взаимозависимых этапов, таких как формирование программы полета и расчет времени экипажа, планирование поблочного грузопотока, где осуществляется расчет и планирование доставки топлива, воды, воздуха, кислорода и продовольствия, ремонтного оборудования и научной аппаратуры, различных материалов и инструментов для сервисного обслуживания МКС и проведения космических экспериментов, размещения доставленных грузов, а также возврата грузов с результатами космических экспериментов и утилизации накапливаемых на МКС отходов, что предъявляет ряд специальных правил, условий и ограничений, а также требует учета множества факторов (грузоподъемность кораблей, объемы отсеков МКС, данные баллистики, вес и объем груза и т. д.).

Работа по планированию грузопотока российского сегмента международной космической станции (РС МКС) до недавнего времени выполнялась вручную проектантами и кураторами грузов, которым для получения рабочего плана приходилось вместе производить много итераций и постоянно взаимодействовать для выработки и согласования компромиссных решений.

Основная сложность планирования заключается во взаимозависимости всех этих планов и принимаемых решений, что требует смыслового согласования и точной координации действий с учетом всех перечисленных факторов.

Вместе с тем в традиционной постановке задачи управления распределением ресурсов до сих пор доминирует централизованный подход, в котором заранее определены все критерии и их важность, все заказы и ресурсы известны заранее и не меняются в ходе работы, а также однородны и обладают одними свойствами или характеристиками. В рассматриваемой же задаче каждая подсистема станции, например система обеспечения жизнедеятельности космонавтов, требует своих ресурсов, часть из которых требует уникальных расходных материалов, а часть – разделяемых ресурсов, часть зависит от интенсивности потребления, а часть зависит от времени, а также обладают другими индивидуальными особенностями.

В настоящей работе приводятся особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС.

### **Общее описание особенностей задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС**

МКС – это один из сложнейших проектов за всю историю человечества, в реализации которого участвуют большие коллективы ученых и инженеров из России, США и ряда других стран [2]. МКС состоит из двух сегментов: российского (РС) и американского (АС). Российская и американская стороны несут ответственность за функционирование своего сегмента и снабжение жизненно важными грузами своей части экипажа.

Одна из важнейших задач жизнеобеспечения работы РС МКС – это управление программой полета и грузопотоком снабжения станции важнейшими грузами, такими как воздух, вода, топливо, продукты питания, оборудование для научных экспериментов, а также возврата результатов экспериментов и других грузов обратно на Землю [3-5].

Программа полета РС МКС представляет собой план распределения стыковок, полета в составе станции и отстыковок пилотируемых транспортных средств

(транспортных кораблей «Союз» (ТК «Союз»), транспортных грузовых кораблей «Прогресс» (ТГК «Прогресс») и транспортных кораблей иностранных партнеров) от основных модулей (портов), составляющих конфигурацию РС МКС. Для каждого полета также учитываются временные периоды автономного полета от старта до стыковки и от отстыковки до приземления (для ТК «Союз») или затопления (для ТГК «Прогресс»). При формировании программы полета учитываются временные ограничения, определяющие интервалы между стыковками и отстыковками, а также баллистические данные, определяемые позицией Солнца, освещенностью «мишени» для стыковки и т. п.

Входные данные, используемые для построения программы полета, включают модель грузопотока РС МКС, данные баллистиков, а также свойства транспортных средств (грузоподъемность сухих грузов, объем баков топлива и воды). При формировании программы полета транспортные средства планируются по времени и распределяются по портам с учетом данных предыдущих периодов на основании количества полетов транспортных средств, определенных в модели грузопотока РС МКС, и с приблизительной равномерностью распределения в течение года полетов транспортных средств. Результат формирования программы полета представляет собой расписание стартов, стыковок, перестыковок и отстыковок с распределением по модулям РС МКС на период (год).

Кроме актуального варианта программы полета необходимо поддерживать несколько альтернативных. Процесс интенсивного формирования программы полета на следующий календарный год идет на протяжении около трех месяцев в конце каждого года. В этот процесс кроме проектантов вовлечены около 50 постоянных кураторов различных подсистем РС МКС. На протяжении года программа полета уточняется по мере возникновения различных событий, которые разрешаются локальными взаимодействиями участников и приводят к пересмотру программы полета и перепланированию стартов, стыковок и отстыковок.

Сформированная актуальная программа полета направляется на согласование и утверждение, после которого предоставляется кураторам для формирования заявок на доставку грузов на РС МКС. В соответствии с программой полета производится планирование грузопотока, где грузы распределяются по полетам транспортных средств.

Для планирования грузопотока требуется учитывать множество разных по своей природе факторов, критериев принятия решений, ограничений и предпочтений. При этом определяется масса сухих грузов, затем проверяется план по топливу, воде и газообразным грузам. Осуществляются проверки временных ограничений (в том числе на операции космонавтов, которые связаны с использованием грузов). В случае возникновения необходимости, например при поступлении срочной и важной заявки от кураторов, проводится возврат к плану доставки сухих грузов для его пересмотра. При анализе балансов питания, топлива, газообразных грузов и воды используются графики баланса. Для воды и питания расход рассчитывается по нормативам, для топлива расход определяется в соответствии с планом коррекций орбиты, стыковок и прочих динамических операций на станции.

При этом любое событие, касающееся полета, например изменение дат запусков, стыковок или отстыковок кораблей, потеря грузового корабля, изменение состава экипажа или внеплановые работы на борту станции, ведет к цепочке перепланирования многих других связанных работ, ресурсы для которых должны быть пересчитаны.

В частности, появление космического мусора на орбите (к примеру, из-за внезапного отказа запущенного спутника и т. д.) вызывает необходимость в маневре станции и корректировке ее орбиты, что требует включения двигателей и затрат топлива, а значит, приводит к необходимости в следующем старте привезти на станцию больше топлива, для чего надо какие-то грузы перепланировать на следующий полет и т. д.

Грузоподъемность космических кораблей ограничена, поэтому если неожиданно возникает потребность в дополнительном грузе, то объемы топлива или воды, а также объемы и массы других грузов приходится уменьшать, согласованно меняя планы отправки грузов на последующих кораблях (рис. 1).

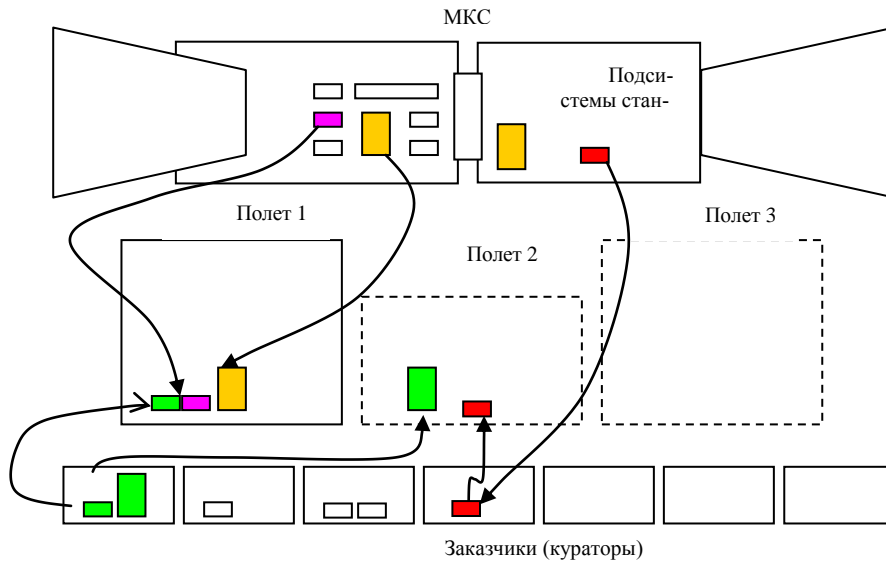


Рис. 1. Планирование грузопотока РС МКС

Зависимость между программой полета и грузопотоком двусторонняя. При изменении программы полета изменяется и грузопоток, где переносятся и перераспределяются различные типы грузов. Если грузы не готовы к запланированному времени, они снимаются. Если в плане грузопотока мало грузов (на конец года накапливается неготовность), какой-то полет может быть отменен, а остаток с него перенесен на более ранние или поздние сроки. Также на грузопоток может влиять осуществление выхода в космос, а изменения грузопотока могут влиять на сроки пусков.

Далее представлена формализованная постановка задачи планирования грузопотока для жизнеобеспечения работы РС МКС.

### Формализация множества фактов и начальных данных

Представим заданный набор начальных данных в виде следующих объектов.

1. Интервал планирования  $IP = [t_{min}; t_{max}]$ , где  $t_{min}$  и  $t_{max}$  – заданные в днях границы интервала планирования.

2. Множество моментов времени внутри интервала планирования с дискретностью один день  $D = \{d_t, t = 1 \dots Nd\}$ , где  $d_t$  – конкретный доступный на интервале планирования момент времени (день),  $t$  – идентификатор момента времени (дня),  $Nd$  – общее количество моментов времени (дней) на интервале планирова-

ния, причем  $t_l = t_{min}$ ,  $t_{Nd} = t_{max}$ .

3. Множество полетов транспортных средств  $P = \{p_i, i=1 \dots Np\}$ , где  $p_i$  – отдельный полет транспортного средства,  $i$  – идентификатор полета транспортного средства,  $Np$  – общее количество полетов транспортных средств.

4. Каждый полет транспортного средства характеризуется набором критериев, представленных множеством  $PP_i = \{pp_{ij}, j=1 \dots Npp\}$ , где  $pp_{ij}$  – отдельный критерий полета транспортного средства  $i$ ,  $j$  – идентификатор отдельного критерия полета транспортного средства  $i$ ,  $Npp$  – общее количество отдельных критериев полета транспортного средства  $i$ . В общем случае критерии полетов транспортных средств могут характеризовать доступный объем баков для топлива, воздуха, жидкостей, «сухих» грузов, даты старта, стыковки, отстыковки и т. п.

5. Длительности полетов транспортных средств представим в виде множества  $INT = \{int_i, i=1 \dots Np\}$ , где  $int_i$  – длительность полета транспортного средства  $i$ .

6. Множество портов (стыковочных узлов) на РС МКС  $S = \{s_c, c=1 \dots Ns\}$ , где  $s_c$  – отдельный порт РС МКС,  $c$  – идентификатор порта РС МКС,  $Ns$  – общее количество портов РС МКС.

7. Множество космонавтов  $KOS = \{kos_r, r = 1 \dots Nkos\}$ , где  $kos_r$  – отдельный космонавт,  $r$  – идентификатор космонавта,  $Nkos$  – общее количество космонавтов.

8. Множество доставляемых грузов  $G = \{g_k, k=1 \dots Ng\}$ , где  $g_k$  – отдельный груз,  $k$  – идентификатор груза,  $Ng$  – общее количество грузов.

9. Каждый груз характеризуется набором критериев, представленных множеством  $PG_k = \{pg_{km}, m=1 \dots Npg\}$ , где  $pg_{km}$  – отдельный критерий груза  $k$ ,  $m$  – идентификатор отдельного критерия груза  $k$ ,  $Npg$  – общее количество отдельных критериев груза  $k$ . В общем случае критерии грузов могут характеризовать тип, массу, объем, габариты, предпочтительное время доставки, срок годности, время эксплуатации и т. п.

10. Множество зон хранения грузов на РС МКС  $Z = \{z_e, e=1 \dots Nz\}$ , где  $z_e$  – отдельная зона хранения грузов на РС МКС,  $e$  – идентификатор зоны хранения грузов,  $Nz$  – общее количество зон хранения грузов.

Также для решения задачи кроме вышеперечисленных исходных данных используется следующая информация: модель грузопотока (определяет годовые потребности в грузах на планируемый период и предоставляет количество транспортных средств), программа полета предыдущего периода, баллистические данные, данные об имеющихся на борту РС МКС грузах и ряд других.

### **Формализация результата решения задачи**

В результате решения поставленной задачи на основе приведенных первоначальных данных необходимо сформировать программу полета и грузопоток РС МКС, а также планы размещения, утилизации и возврата грузов.

1. При построении программы полета на основе вышеперечисленных исходных данных полеты транспортных средств планируются с приближительной равномерностью по времени и распределяются по портам.

Программу полета можно представить в виде множества

$$PT = \{p_i, PP_i, ds_i, dd_i, do_i, int_i, s_c, \{kos_r\}\}_{i=1}^{Np},$$

где  $i$  – идентификатор полета транспортного средства,  $Np$  – общее число полетов транспортных средств,  $p_i$  – отдельный полет транспортного средства,  $PP_i$  –

множество критериев полета транспортного средства  $p_i$ ,  $ds \in [t_{min}, \dots, t_{max}]$  – день старта полета транспортного средства  $i$ ,  $dd \in [t_{min}, \dots, t_{max}]$  – день стыковки полета транспортного средства  $i$ ,  $do \in [t_{min}, \dots, t_{max}]$  – день отстыковки полета транспортного средства  $i$ ,  $int_i$  – длительность полета транспортного средства  $i$ ,  $s_c$  – отдельный порт РС МКС,  $\{kos_r\}$  – множество космонавтов, доставляемых на МКС на ТК «Союз».

2. При планировании грузопотока на основе вышеперечисленных исходных данных формируется распределение доставляемых грузов по полетам транспортных средств.

План грузопотока можно представить в виде множества

$$PG = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}\}_{i=1}^{Np},$$

где  $i$  – идентификатор полета транспортного средства,  $Np$  – общее число полетов транспортных средств,  $p_i$  – отдельный полет транспортного средства,  $PP_i$  – множество критериев полета транспортного средства,  $\{g_k\}$  – множество доставляемых грузов,  $\{PG_k\}$  – множество критериев доставляемых грузов  $\{g_k\}$ .

3. При планировании размещения грузов на борту РС МКС на основе вышеперечисленных исходных данных доставляемые грузы распределяются по зонам хранения РС МКС.

План размещения можно представить в виде множества

$$PR = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}, \{z_e\}\}_{i=1}^{Np},$$

где  $i$  – идентификатор полета транспортного средства,  $Np$  – общее число полетов транспортных средств,  $p_i$  – отдельный полет транспортного средства,  $PP_i$  – множество критериев полета транспортного средства,  $\{g_k\}$  – множество доставляемых грузов,  $\{PG_k\}$  – множество критериев доставляемых грузов  $\{g_k\}$ ,  $\{z_e\}$  – множество зон хранения грузов на РС МКС.

4. При планировании утилизации грузов с борта РС МКС на ТК «Прогресс» на основе вышеперечисленных исходных данных размещенные на борту РС МКС грузы распределяются по ТК «Прогресс» для затопления.

План утилизации можно представить в виде множества

$$PU = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}\}_{i=1}^{Np},$$

где  $i$  – идентификатор полета транспортного средства,  $Np$  – общее число полетов транспортных средств,  $p_i$  – отдельный полет транспортного средства,  $PP_i$  – множество критериев полета транспортного средства,  $\{g_k\}$  – множество утилизируемых грузов,  $\{PG_k\}$  – множество критериев утилизируемых грузов  $\{g_k\}$ .

5. При планировании возврата грузов с борта РС МКС на ТК «Союз» на основе вышеперечисленных исходных данных размещенные на борту РС МКС грузы распределяются по ТК «Союз» для доставки на Землю.

План возврата можно представить в виде множества

$$PV = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}, \{kos_r\}\}_{i=1}^{Np},$$

где  $i$  – идентификатор полета транспортного средства,  $Np$  – общее число полетов транспортных средств,  $p_i$  – отдельный полет транспортного средства,  $PP_i$  – множество критериев полета транспортного средства,  $\{g_k\}$  – множество возвращаемых грузов,  $\{PG_k\}$  – множество критериев возвращаемых грузов  $\{g_k\}$ ,  $\{kos_r\}$  –

множество космонавтов, возвращаемых на Землю на ТК «Союз».

Для обеспечения возможности оптимального формирования программы полета  $PT$ , планов грузопотока  $PG$ , размещения  $PR$ , утилизации  $PU$  и возврата  $PV$  следует определить частные критерии оценки решения и комплексный критерий оценки результата. Далее описывается формализация критериев оптимизации, а также система правил и ограничений, влияющих на результат планирования.

### **Формализация представления различных частных критериев оценки решения задачи**

В зависимости от конкретных требований прикладной области и генеральных задач в качестве критериев следует рассматривать целый ряд условий. В частности, для случая формирования программы полета и грузопотока РС МКС наиболее обоснованными являются следующие.

1. Максимальное удовлетворение отдельных критериев полета транспортных средств. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого критерия отдельного полета транспортного средства:

$$W_{ij} = f_{ij}(pp_j, pp_{ij}^{id}) \rightarrow \max,$$

где  $f_{ij}$  – оценочная функция удовлетворенности по критерию  $j$  полета транспортного средства  $i$ ,  $pp_j$  – текущее значение критерия  $j$  полета транспортного средства  $i$ ,  $pp_{ij}^{id}$  – идеальное значение критерия  $pp_j$  полета транспортного средства  $i$ .

2. Максимальное удовлетворение отдельных критериев грузов. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого критерия отдельного груза:

$$W_{km} = f_{km}(pg_m, pg_{km}^{id}) \rightarrow \max,$$

где  $f_{km}$  – оценочная функция удовлетворенности по критерию  $m$  груза  $k$ ,  $pg_k$  – текущее значение критерия  $m$  груза  $k$ ,  $pg_{km}^{id}$  – идеальное значение критерия  $pg_k$  груза  $k$ .

3. Максимальное удовлетворение отдельных портов на РС МКС. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого порта РС МКС:

$$W_c = f_c(s, s_c^{id}) \rightarrow \max,$$

где  $f_c$  – оценочная функция удовлетворенности порта  $c$  на РС МКС,  $s$  – текущее значение критерия порта  $c$ ,  $s_c^{id}$  – идеальное значение порта  $s_c$ .

4. Максимальное удовлетворение зон хранения грузов на РС МКС. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности каждой зоны хранения:

$$W_e = f_e(z, z_e^{id}) \rightarrow \max,$$

где  $f_e$  – оценочная функция удовлетворенности зоны хранения  $e$ ,  $z$  – текущее значение критерия зоны хранения,  $z_e^{id}$  – идеальное значение зоны хранения  $z_e$ .

Вышеперечисленные оценочные функции удовлетворенности строятся таким образом, чтобы при минимальной разности между текущим значением критерия и его идеальным значением значение функции было максимальным. В общем случае оценочные функции удовлетворенности представляют собой кусочно-непрерывные функции на интервальных множествах и могут иметь различный вид; например, один из вариантов может иметь треугольный вид (рис. 2), где максимальная удовлетворенность появляется при совпадении текущего значения

критерия с его идеальным значением и плавно уменьшается при удалении текущего значения критерия от его идеального значения.

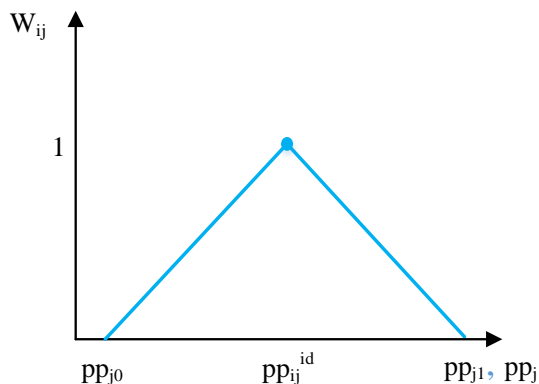


Рис. 2. Функция удовлетворенности треугольной формы по критерию  $j$  полета транспортного средства  $i$

К текущей задаче возможно применение и более емких по смыслу критериев или критериев, которые могут появиться при возникновении какой-нибудь ситуации или изменении условий в будущем, поэтому метод решения задачи должен предусматривать возможность расширения числа критериев и изменения их приоритетности при изменении ситуации.

При построении функций удовлетворенности частных критериев  $W_{ij}$ ,  $W_{km}$ ,  $W_c$ ,  $W_e$  необходимо соблюдать требования их нормирования и сведения к безразмерным величинам, чтобы далее можно было их свести к обобщенному виду с применением весовых коэффициентов для построения комплексного критерия.

### Построение комплексного критерия на основе частных критериев

Нормированные и сведенные к безразмерным величинам вышеописанные частные критерии  $W_{ij}$ ,  $W_{km}$ ,  $W_c$ ,  $W_e$  необходимо свести к комплексному критерию для максимизации суммарной ценности решения задачи планирования программы полета, грузопотока, размещения, утилизации и возврата грузов РС МКС.

Для этого воспользуемся методом свертывания векторного критерия, который является наиболее распространенным методом решения многокритериальных задач, учитывающим относительную важность частных критериев удовлетворенности отдельных критериев. Цель оптимизации состоит в максимизации общей функции удовлетворенности суммарной ценности решения задачи. Для решения задачи со многими частными критериями и построения на их основе обобщающего комплексного критерия будем использовать аддитивную функцию с подбором весовых коэффициентов:

$$F = \sum_{h=1}^H y_h W_h \rightarrow \max,$$

где  $F$  – комплексный критерий решения задачи планирования,  $y_h$  – значение весового коэффициента для критерия  $h$ , при этом  $0 \leq y_h \leq 1$  и нормируются  $\sum_{h=1}^H y_h = 1$ ,  $W_h$  – значение нормированного критерия  $h$ ,  $H$  – общее количество критериев оптимизации планирования,  $h$  – порядковый номер критерия.



Применяемый метод свертывания векторного критерия, который называется методом взвешенных сумм, позволяет изменять приоритет частным критериям оптимальности за счет изменения для них значений весовых коэффициентов  $y_h$ , повышая при этом наиболее важным и уменьшая менее значимым на данный момент, при этом адаптивно подстраиваясь под изменяющуюся ситуацию. При этом частные критерии должны быть количественно соизмеримы между собой – нормализованы и приведены к безразмерному виду.

Построение обобщенного комплексного критерия может идти в несколько этапов.

1. Максимальное удовлетворение полета транспортного средства. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности отдельного полета транспортного средства за счет свертывания частных критериев полета транспортного средства:

$$W_i = \sum_{j=1}^{Npp} y_{ij}^{PP} W_{ij} \rightarrow \max,$$

где  $W_i$  – комплексный критерий полета транспортного средства  $i$ ,  $y_{ij}^{PP}$  – значение весового коэффициента для критерия  $j$  полета транспортного средства  $i$ , при этом  $0 \leq y_{ij}^{PP} \leq 1$  и нормируются  $\sum_{j=1}^{Npp} y_{ij}^{PP} = 1$ ,  $W_{ij}$  – значение нормированного критерия  $j$  полета транспортного средства  $i$ ,  $Npp$  – общее количество критериев полета транспортного средства  $i$ ,  $j$  – порядковый номер критерия полета транспортного средства  $i$ .

2. Максимальное удовлетворение набора полетов транспортных средств. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности системы полетов транспортных средств за счет свертывания частных критериев полетов транспортных средств:

$$W^P = \sum_{i=1}^{Np} y_i^P W_i \rightarrow \max,$$

где  $W^P$  – комплексный критерий системы полетов транспортных средств,  $y_i^P$  – значение весового коэффициента для полета транспортного средства  $i$ , при этом  $0 \leq y_i^P \leq 1$  и нормируются  $\sum_{i=1}^{Np} y_i^P = 1$ ,  $W_i$  – значение нормированного критерия полета транспортного средства  $i$ ,  $Np$  – общее количество полетов транспортных средств,  $i$  – порядковый номер полета транспортного средства.

3. Максимальное удовлетворение груза. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности отдельного груза за счет свертывания частных критериев грузов:

$$W_k = \sum_{m=1}^{Npg} y_{km}^{PG} W_{km} \rightarrow \max,$$

где  $W_k$  – комплексный критерий груза  $k$ ,  $y_{km}^{PG}$  – значение весового коэффициента для критерия  $m$  груза  $k$ , при этом  $0 \leq y_{km}^{PG} \leq 1$  и нормируются  $\sum_{m=1}^{Npg} y_{km}^{PG} = 1$ ,  $W_{km}$  – значение нормированного критерия  $m$  груза  $k$ ,  $Npg$  – общее количество критериев груза  $k$ ,  $m$  – порядковый номер критерия груза  $k$ .

4. Максимальное удовлетворение набора грузов. Цель оптимизации состоит

в максимизации функции удовлетворенности системы грузов за счет свертывания частных критериев грузов:

$$W^G = \sum_{k=1}^{Ng} y_k^G W_k \rightarrow \max,$$

где  $W^G$  – комплексный критерий системы грузов,  $y_k^G$  – значение весового коэффициента для груза  $k$ , при этом  $0 \leq y_k^G \leq 1$  и нормируются  $\sum_{k=1}^{Ng} y_k^G = 1$ ,  $W_k$  – значение нормированного критерия груза  $k$ ,  $Ng$  – общее количество грузов,  $k$  – порядковый номер груза.

5. Максимальное удовлетворение системы портов. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности системы портов за счет свертывания частных критериев портов:

$$W^S = \sum_{c=1}^{Ns} y_c^S W_c \rightarrow \max,$$

где  $W^S$  – комплексный критерий системы портов,  $y_c^S$  – значение весового коэффициента для порта  $c$ , при этом  $0 \leq y_c^S \leq 1$  и нормируются  $\sum_{c=1}^{Ns} y_c^S = 1$ ,  $W_c$  – значение нормированного критерия порта  $c$ ,  $Ns$  – общее количество портов,  $c$  – порядковый номер порта.

6. Максимальное удовлетворение системы зон хранения грузов. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности системы зон хранения грузов за счет свертывания частных критериев зон хранения:

$$W^Z = \sum_{e=1}^{Nz} y_e^Z W_e \rightarrow \max,$$

где  $W^Z$  – комплексный критерий системы зон хранения грузов,  $y_e^Z$  – значение весового коэффициента для зоны хранения грузов  $e$ , при этом  $0 \leq y_e^Z \leq 1$  и нормируются  $\sum_{e=1}^{Nz} y_e^Z = 1$ ,  $W_e$  – значение нормированного критерия зоны хранения грузов  $e$ ,  $Nz$  – общее количество зон хранения,  $e$  – порядковый номер зоны хранения.

7. Максимальное удовлетворение обобщенного комплексного критерия решения задачи планирования. Цель оптимизации состоит в максимизации функции удовлетворенности комплексного критерия за счет свертывания частных критериев системы полетов транспортных средств, системы грузов, системы портов и системы зон хранения грузов, полученных выше на шагах 2, 4, 5, 6:

$$F = y_p W^P + y_g W^G + y_s W^S + y_z W^Z \rightarrow \max,$$

где  $F$  – комплексный критерий решения задачи планирования,  $y_p, y_g, y_s, y_z$  – значение весовых коэффициентов для критериев набора полетов транспортных средств, набора грузов, набора портов и набора зон хранения грузов, при этом  $0 \leq y_h \leq 1$  и нормируются  $\sum_{h=1}^H y_h = 1$ ,  $W^P, W^G, W^S, W^Z$  – значение нормированных критериев.

В данном случае функция  $F \rightarrow \max$  будет целевой функцией задачи оптимизации.

На данном этапе произведена постановка задачи с формализацией исходных данных, формализован результат решения задачи, определены частные критерии

оптимизации и сформулировано построение комплексного критерия решения задачи планирования на их основе. Следующий шаг заключается в определении весовых коэффициентов системы частных критериев, который в данной статье не рассматривается, и построении системы правил и ограничений.

### Построение системы правил и ограничений

Помимо определения частных критериев оценки и построения на их основе комплексного критерия оптимизации планирования для решения задачи формирования программы полета и грузопотока РС МКС требуется сформулировать систему правил и ограничений группового планирования, отражающих специфику процесса составления различных взаимосвязанных планов для РС МКС.

Выявление, систематизация и описание большого множества таких правил и ограничений, которые влияют на качество планирования, является отдельной самостоятельной работой, поэтому здесь для примера приведем только несколько самых основных правил и ограничений, которые влияют на итоговый план программы полета и грузопотока РС МКС.

1. Количество космонавтов, доставляемых на ТК «Союз» на борт МКС, должно быть три человека:

$$\sum_{r=1}^{Nkos} kos_r = 3,$$

где  $\sum_{r=1}^{Nkos} kos_r$  – количество космонавтов, размещающихся на транспортном средстве.

2. Минимальный интервал времени между стартом и отстыковкой на одном порту не должен быть меньше чем T1 дней:

$$ds_{i+1} - do_i \geq T1,$$

где  $do_i$  – дата отстыковки транспортного средства  $i$ ,  $ds_{i+1}$  – дата стыковки следующего транспортного средства.

3. Количество дней полета транспортного средства в составе РС МКС должно быть T2 дней:

$$do_i - ds_i = T2,$$

где  $ds_i$  – дата стыковки транспортного средства  $i$ ,  $do_i$  – отстыковки транспортного средства  $i$ .

4. Суммарное количество грузов, запланированных на полет транспортного средства, не должно превышать грузоподъемность транспортного средства:

$$\frac{\sum_k pg_{km}^{mass}}{pg_{ii}^{gruz}} \leq 1,$$

где  $pg_{ii}^{gruz}$  – критерий  $j$ , характеризующий грузоподъемность транспортного средства  $i$ ,  $pg_{km}^{mass}$  – критерий  $m$ , характеризующий массу груза  $k$ ,  $\sum_k pg_{km}^{mass}$  – сумма масс всех грузов, размещающихся на транспортном средстве  $i$ .

5. Доставляемые на борт станции грузы должны размещаться в закрепленных за этим типом грузов зонах:

$$\sum_{k=1}^{Ng} pg_{km} = \sum_{e=1}^Z z_e^{m1},$$

где  $m1$  – тип зоны хранения,  $\sum_{k=1}^{Ng} pg_{km}$  – все грузы с критерием  $m$  применительно к зонам хранения с типом  $m1$ ,  $\sum_{e=1}^Z z_e^{m1}$  – все зоны хранения с типом  $m1$  для данного типа  $m$  груза.

6. Груз должен быть утилизирован через  $T3$  дней полета в составе станции:

$$ds_i + pg_{km} = T3 \leq do_i,$$

где  $pg_{km}$  – критерий  $m$  количества дней до утилизации груза  $k$ ,  $ds_i$  – дата старта полета транспортного средства  $i$ ,  $do_i$  – дата отстыковки полета транспортного средства  $i$ .

Перечень вышеприведенных правил и ограничений в дальнейшем может быть значительно расширен и дополнен и не является предметом рассмотрения в данной статье. Правила и ограничения не являются единожды заданными и постоянными, а зависят от конкретной, складывающейся на данный момент модели ситуации и потока входящих событий, при этом в одних ситуациях необходимо использовать одни правила и ограничения, а в других, например нештатных и аварийных, – другие. Такие постоянно изменяющиеся модели ситуаций с правилами и ограничениями, приоритет которых постоянно меняется, можно описывать с помощью онтологических моделей [6-8].

На качество решения задачи планирования напрямую влияет применение следующей совокупности оптимизационных методов формирования программы полета и грузопотока РС МКС:

- исходные данные;
- используемые частные критерии оптимальности;
- значение весовых коэффициентов для построения системы аддитивных комплексных критериев;
- правила и ограничения планирования.

Если для выработки итоговой программы полета и грузопотока РС МКС применить специальную систему формирования программы полета и планирования грузопотока РС МКС, то ее входными параметрами будут выступать перечисленные выше факторы, а на выходе такой системы получается готовый план (рис. 3).

В работе предложена постановка задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС. Формализовано множество фактов начальных данных, таких как множество полетов транспортных средств  $P$  с набором характеризующих их критериев  $PP_i$ , множество грузов  $G$  с набором характеризующих их критериев  $PG_k$ , а также даны множества космонавтов  $KOS$ , портов  $S$ , зон хранения грузов  $Z$ . При решении задачи необходимо сформировать программу полета  $PT$  и грузопоток  $PG$ , а также планы размещения грузов на борту станции  $PR$ , утилизации  $PU$  и возврата грузов  $PV$ . При планировании необходимо учитывать критерии максимизации удовлетворенности полетов транспортных средств  $W^P$ , грузов  $W^G$ , портов  $W^S$  и зон хранения  $W^Z$ , при этом необходимо учитывать систему правил и ограничений планирования, например не превышение грузоподъемности транспортных средств, минимизацию интервалов времени между стартом и отстыковкой на одном порту, ограничения по количеству дней полета транспортного средства, приоритеты по размещению грузов на борту станции и т. п.

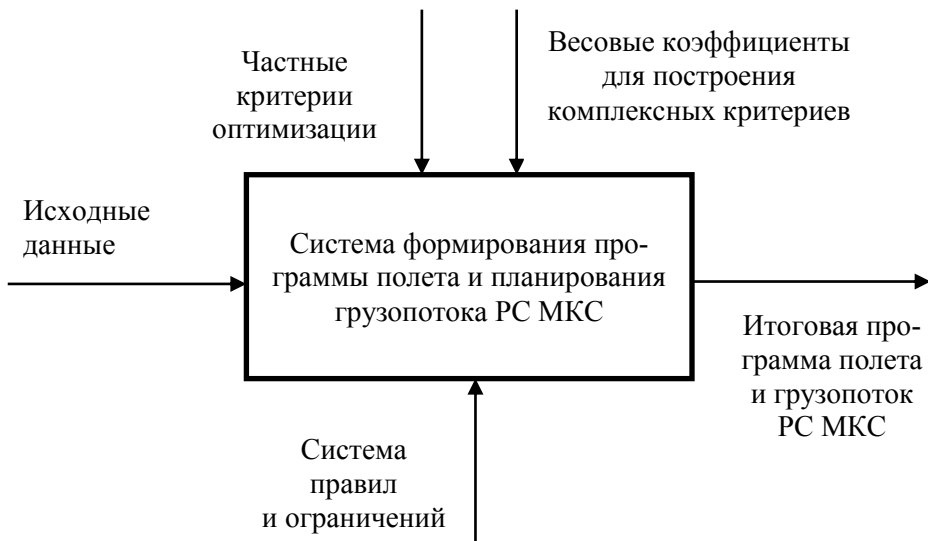


Рис. 3. Элементы системы формирования программы полета и планирования грузопотока РС МКС

Данную задачу предлагается решать с помощью мультиагентных технологий, предметных онтологий и сетецентрического подхода для согласованного взаимодействия различных планировщиков, так как они позволяют достаточно быстро решать подобные сложные задачи планирования с множеством объектов, параметров, событий и большой динамикой их изменения и обеспечивают возможность изменения числа критериев, правил и ограничений для адаптивной подстройки к изменяющейся ситуации [9-12].

Решение поставленной задачи с помощью предлагаемого подхода позволит найти баланс интересов и построить планы программы полета и грузопотока РС МКС, удовлетворяющие все заинтересованные стороны, запланировать как можно больше грузов, которые являются наиболее важными и срочными, и доставить их на борт РС МКС как можно быстрее и эффективнее.

### **Заключение**

В работе описывается проблема и актуальность формирования программы полета и планирования грузопотока РС МКС, а также дается общее описание особенности задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС.

Впервые сформулирована формализованная математическая постановка задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС, где описываются множество фактов и начальных данных, результаты решения задачи планирования, различные частные критерии оценки решения задачи, метод построения комплексного критерия на основе частных критериев, подход к построению системы правил и ограничений.

Дается краткое обоснование, что для решения данной многокритериальной задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС необходимо использовать мультиагентные технологии, предметные онтологии и сетецентрический подход для согласованного взаимодействия различных планировщиков.

Решение сформулированной формализованной задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС с помощью предлагаемых подходов будет способствовать созданию гибких самоорганизующихся программ полета и планов грузопотока, размещения, утилизации и возврата, что повысит скорость формирования, надежность, качество, эффективность и безопасность планов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. *Скобелев П.О., Симонова Е.В., Сюсин И.А., Царев А.В., Кожевников С.С.* Опыт создания мультиагентных систем для аэрокосмических применений // Интеллектуальные системы (INTELS'2012): Труды X Международного симпозиума, Вологда, 25-29 июня 2012 г. – М.: РУСАКИ, 2012. – С. 251-254.
3. *Иващенко А.В., Матвеев К.Ю., Новиков А.Л., Симонова Е.В., Скобелев П.О., Сычева М.В., Хамиц И.И.* Мультиагентная подсистема построения программы полета Международной космической станции // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010): Труды Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Самара, 29 сентября – 1 октября 2010 г. – Самара: СГАУ, 2010. – С. 98-101.
4. *Дязитдинова А.Р., Иващенко А.В., Литвинов И.И., Новиков А.Л., Скобелев П.О., Сычева М.В., Хамиц И.И.* Обеспечение согласованного взаимодействия по планированию грузопотока Международной космической станции с помощью мультиагентных технологий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII Международной конференции, Самара, 2011. – Самара: СНЦ РАН, 2011. – С. 435-442.
5. *Бидеев А.Г., Карбовничий В.А., Майоров И.В., Новиков А.Л., Скобелев П.О., Сычева М.В.* Метод адаптивного планирования грузопотока в интерактивной мультиагентной системе расчета программы полета, грузопотока и ресурсов российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1(4). – С. 29-38.
6. *Матюшин М.М., Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Скобелев П.О., Лахин О.И., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Носкова А.И.* Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2(69). – С. 9-17.
7. *Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Лахин О.И., Матюшин М.М., Скобелев П.О.* Онтология российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014), 20–22 февраля 2014 г. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 221-226.
8. *Вакурина Т.Г., Лахин О.И., Юрыгина Ю.С., Симонова Е.В., Коршиков Д.Н., Носкова А.И.* Корпоративная распределенная онтология для управления российским сегментом международной космической станции // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 30 июня – 03 июля 2014 г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 435-443.
9. *Скобелев П.О.* Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Антометрия. – 2002. – № 6. – С. 45-61.
10. *Скобелев П.О.* Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 12. – С. 33-46.
11. *Батищев С.В., Батищева Т.В., Иноземцев С.В., Ивкушкин К.В., Скобелев П.О.* Опыт применения мультиагентной системы планирования расписаний в задаче транспортной логистики // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара, СНЦ РАН. – 27 июня 2005 г. – С. 388-396.
12. *Скобелев П.О.* Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. – № 1. – С. 1–32.

*Статья поступила в редакцию 2 июня 2015 г.*

# PROBLEM STATEMENT PECULIARITIES OF FLIGHT PROGRAM AND CARGO FLOW SCHEDULING OF THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

***O.I. Lakhin***

Smart Solutions, Ltd.  
17, Moskovskoe shosse, Samara, 443013, Russian Federation  
Business center "Vertical", office 1201

E-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru

*The problem statement peculiarities of the flight program and cargo-traffic scheduling of the International Space Station Russian Segment are considered. The criteria, rules, and constraints which influence the scheduling of the flight program and cargo traffic are described. Using a formalized approach, the paper demonstrates how a dynamic balance of interests of the spacecrafts, the ISS RS modules and on-board systems, as well as flights and cargos, is achieved. It presupposes mutually coordinated consideration of a range of individual peculiarities of the cargos, spacecrafts, the ISS RS modules and on-board systems. The conclusion that the multi-agent technology, domain ontology, and network-centric approach can be efficiently used for the problem solution is proved, since they enable designing flexible self-organizing flight programs and cargo-traffic schedules.*

**Keywords:** *the Russian Segment of the International Space Station, flight program, cargo flow scheduling, multi-agent technology, particular optimization criteria, scheduling rules and constraints, domain ontology, network-centric approach.*