

Горбунов Е.Д.

Об одном подходе к определению оптимальной программы развития космических средств вооружения в условиях ресурсных ограничений¹

В статье приведен математический аппарат поиска оптимальной программы развития космических средств вооружения в условиях ресурсных ограничений. Сформулировано условие оптимальности, представлена постановка задачи определения оптимальной программы развития, выбран метод ее решения и разработан соответствующий алгоритм.

Ограниченность финансовых средств, выделяемых на программные мероприятия по развитию космических средств вооружения (КСВ), делает невозможным реализацию потребного варианта (программы) развития² данного класса вооружений. Возникает задача поиска наилучшего варианта развития, удовлетворяющего условию не превышения выделяемого объема финансовых средств. Решение данной задачи ввиду достаточно широкой номенклатуры КСВ сопряжено с необходимостью рассмотрения большого количества возможных альтернативных вариантов, прямой перебор которых в целях выбора из них оптимального связан со значительными трудностями, в том числе и в случае применения вычислительной техники. В настоящее время не существует методов, позволяющих оперативно и с достаточной точностью решить указанную задачу. В таких условиях вопрос разработки процедуры (метода) поиска оптимальной программы развития КСВ имеет высокую актуальность.

Рассматриваемая задача определения оптимальной программы развития КСВ, удовлетворяющей ограничению по выделяемым ресурсам, относится к классу задач теории оптимального управления. Постановка задачи должна включать описание управляемой системы, условия оптимальности, управляющего вектора и его

функциональной связи с фазовым вектором (вектором состояния системы) и ограничений вдоль траектории [1]. Ниже последовательно рассмотрим каждый из указанных элементов задачи.

Структурно КСВ представляют собой совокупность орбитальных группировок космических аппаратов (ОГ КА) различного целевого назначения, средств выведения (СВ) и наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) КА. Основным видом космических средств вооружения, реализующим их функциональное назначение - информационное обеспечение вооруженных сил - являются ОГ КА. Этот же вид космических средств вооружения является определяющим в структуре затрат на программные мероприятия по развитию системы КСВ. При этом развитие остальных видов КСВ (средств выведения, наземного автоматизированного комплекса управления КА) осуществляется в тесной связи с развитием ОГ КА и во многом опирается на программу их развития. Поэтому в дальнейшем в целях упрощения задачи под оптимальным вариантом программы развития КСВ в целом будем понимать оптимальный вариант программы развития системы ОГ КА.

Далее следует определить, что понимать под *оптимальностью развития* ОГ КА? Какому условию должна удовлетворять программа развития, чтобы считаться оптимальной? Применительно к ОГ КА наибольший интерес представляет собой условие достижения некоторой максимальной полезности (интегрального эффекта) от функционирования ОГ различ-

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта Президента РФ НШ-26.2010.10.

² Под вариантом (программой, планом) развития понимается совокупность взаимосвязанных программных мероприятий (НИОКР, серийные закупки и ремонт) развития КСВ, распределенных по времени программного периода.



ного назначения, реализуемой в течение программного периода. Особый интерес к данному условию продиктован тем обстоятельством, что КА функционируют практически непрерывно на протяжении всего своего срока активного существования (САС) как в процессе повседневной деятельности в мирное время, так и в условиях боевых действий [2].

Поскольку ОГ КА различного назначения в достаточной степени функционально независимы, то показатель полезности КСВ $\Omega_{КСВ}$ можно представить некоторой функцией от полезностей системы орбитальных группировок КА различного назначения:

$$\Omega_{КСВ} = \Omega_{КСВ} \Pi, \quad (1)$$

где Π – вектор полезности системы ОГ КА с координатами Π_i – полезность ОГ КА i -го назначения ($i=1, \dots, m$, где m – число частных ОГ КА).

При этом полезность каждой из группировок КА в отдельности представляется интегралом от показателя эффективности ее функционирования по времени программного периода. Поскольку единицей программного периода, как правило, является год ($\Delta t = 1$ год), то полезность i -й группировки КА (Π_i) можно выразить как сумму средних годовых показателей эффективности:

$$\Pi_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T W_i(t) \cdot \Delta t = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T W_i(t) \cdot 1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T W_i(t), \quad (2)$$

где $W_i(t)$ – показатель эффективности функционирования ОГ КА i -го назначения в t -м году,

T – продолжительность программного периода (интервал планирования), выраженная в годах.

Установление формы функциональной связи между полезностью КСВ в целом и полезностями составляющих орбитальных группировок КА различного назначения, указанной в формуле (1), сопряжено с большими трудностями. Многообразие и разнородность задач, решаемых КСВ, различия в формах информации, предоставляемой (передаваемой) космическими ап-

паратами потребителям, многоуровневость (от тактического до стратегического) потребителей, существенная зависимость показателей эффективности от степени развития потребителей и от связей между ними, зависимость от внешних условий функционирования – все это делает задачу оценки эффективности функционирования КСВ в целом трудновыполнимой.

Выходом из данного положения является отказ от условия оптимальности в виде $\Omega_{КСВ} \rightarrow \max$ и представление задачи в многокритериальной форме. В таком случае процедура решения задачи представляет собой поиск такой программы развития (векторной функции $u(t)$ вводимых в эксплуатацию в течение программного периода КА³, составляющих ОГ различного назначения), удовлетворяющей системе ограничений⁴, которая доставляет максимум показателям полезности всех ОГ КА

$$\Pi_i u(t) \rightarrow \max_{u(t)}, \quad \forall i \in 1, \dots, m. \quad (3)$$

При этом ввиду невозможности достижения максимума Π_i для всех i -х ОГ КА одновременно (вследствие ограниченности выделяемых ресурсов) задача сводится к поиску некоторого компромиссного решения на основе использования выбранного метода и критерия решения многокритериальной задачи.

Существует множество методов решения многокритериальных задач (выделения главного критерия, лексикографического упорядочения критериев, последовательных уступок и др.) [3]. В данной работе для решения задачи предлагается использовать метод «идеальной точки» с обобщенным показателем в квадратичной форме [3, 4]:

$$K_{КСВ} = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot (\Pi_i^* - \Pi_i)^2, \quad (4)$$

³ Здесь и далее принимается, что год вывода КА на орбиту соответствует году его ввода в эксплуатацию.

⁴ Система ограничений, накладываемых на программу развития, будет рассмотрена ниже.



где $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$,

β_i – коэффициент значимости i -й ОГ КА, как правило, назначаемый экспертным путем,

Π_i^* – значение полезности i -й ОГ КА, соответствующее «идеальной» программе ее развития⁵.

Оптимальная программа развития КСВ должна обеспечивать достижение минимального значения показателя $K_{КСВ}$ при удовлетворении ограничения по выделяемым ресурсам.

Следует отметить, что выбранное условие оптимальности (4) не учитывает научно-технические и прочие риски реализации программных мероприятий. Данный недостаток накладывает ограничение на применимость показателя полезности в условиях оценки целесообразности проведения мероприятий, сопряженных с высокими рисками.

Кроме того, целесообразно несколько скорректировать сформулированное выше понятие полезности, определенное формулой (2). Причиной данной коррекции является следующее. Полезность КА, закупаемых (а соответственно и функционирующих) с начала программного периода будет выше, нежели КА, закупаемых в его конце. Это объясняется тем, что для КА, функционирующих с конца программного периода, срок активного существования (ресурс) укладывается лишь частично в программный период. Остаток срока активного существования, а соответственно и остаток полезности данного вооружения, будет реализовываться уже после истечения программного периода. Для некоторых КА, САС которых близок или превышает продолжительность программного периода (например, для КА на геостационарной орбите), данное обстоя-

тельство может оказывать существенное влияние уже с первых лет периода планирования. В таком случае следует ожидать интенсивной деградации ОГ КА по истечении программного периода, поскольку основные закупки КА (исходя из принятого понимания полезности) будут сконцентрированы в начале программного периода. Для устранения данного недостатка следует учитывать полезность КСВ не только в рамках программного периода, но и за его пределами, что позволит обеспечить более равномерное распределение закупок по времени программного периода.

В таком случае полезность i -й группировки КА выражается следующим образом:

$$\Pi_i = \frac{1}{T} \left(\sum_{t=1}^T W_i t + \sum_{t=T+1}^{\infty} W_i t \right). \quad (5)$$

Второе слагаемое суммы в правой части выражения (5) $\sum_{t=T+1}^{\infty} W_i t$ представляет собой полезность КА, входящих в состав ОГ к моменту окончания программного периода, которая реализуется после его окончания (рассчитывается исходя из динамики убыли состава ОГ при условии отсутствия программных мероприятий по развитию КСВ после окончания программного периода). При этом символ бесконечности « ∞ » в данной сумме применен формально. В действительности, поскольку срок активного существования КА, составляющих ОГ, конечен, то и число членов суммы соответственно будет конечно и равно числу лет до момента истечения САС последнего КА, введенного в эксплуатацию в программном периоде.

Далее рассмотрим *управляемую систему* и подход к оценке показателя эффективности i -й ОГ $W_i(t)$, входящего в выражение (5).

Эффективность функционирования i -й ОГ КА в t -м году зависит от количественного состава и ТТХ космических аппаратов, составляющих ОГ, а также от предъявляемых к ней требований. В целях упрощения описания связи между эффективностью ОГ КА и факторами, оказыва-

⁵ Под «идеальной» полезностью понимается ее значение, соответствующее потребной программе развития соответствующей ОГ. Потребная программа развития представляет собой программу наискорейшего развития, не учитывающую ограничение по выделяемым ресурсам.

ющими на нее влияние, примем следующие допущения:

1. Основные показатели, характеризующие эффективность i -й ОГ, пропорциональны количественному составу ОГ⁶.

2. Требования, предъявляемые к ОГ в целом и к КА в частности, слабо изменяются в пределах программного периода, поэтому их допустимо принять условно постоянными.

3. Требования к ОГ в целом обычно выражаются в виде требований к ее количественному составу, которые, как правило, не меняются при переходе от текущего поколения КА, составляющих ОГ, к последующему.

Учитывая указанные допущения, показатель эффективности функционирования ОГ КА i -го назначения можно выразить следующим образом:

$$W_i(t) = \frac{1}{n_i^{\text{потр}}} \sum_{j=1}^{m_i} \alpha_{ij} \cdot n_{ij}(t),$$

(6)

где m_i – число типов⁷ КА, составляющих ОГ i -го назначения,

α_{ij} – коэффициент технического уровня КА j -го типа ОГ i -го назначения (учитывает степень соответствия ТТХ КА j -го типа требованиям, к ним предъявляемым, и характеризует современность КА),

$n_{ij}(t)$ – число КА j -го типа в i -й ОГ в t -м году,

$n_i^{\text{потр}}$ – потребное число КА в i -й ОГ.

Состав орбитальной группировки $n_{ij}(t)$ зависит от распределения числа КА, выводимых на орбиту (от векторной функции управления $u(t)$) и срока их активного существования:

$$n_{ij}(t) = \sum_{\tau=R_{ij}+1}^{t} u_{ij}(\tau),$$

где R_{ij} – САС КА j -го типа,

$u_{ij}(\tau)$ – число КА j -го типа i -й ОГ, вводимых в эксплуатацию в τ -м году.

С учетом формул (6) и (7) представим показатель эффективности i -й ОГ КА через распределение числа КА, выводимых на орбиту искусственных спутников Земли (ОИСЗ) в соответствии с программными мероприятиями:

$$W_i(t) = \frac{1}{n_i^{\text{потр}}} \sum_{j=1}^{m_i} \alpha_{ij} \sum_{\tau=R_{ij}+1}^{t} u_{ij}(\tau).$$

Иными словами, для определения текущей эффективности ОГ КА в t -м году необходимо просуммировать по каждому j -му типу КА, входящему в состав i -й ОГ, количество КА, выведенных на орбиту $u_{ij}(\tau)$ до t -го момента времени в пределах соответствующих сроков активного существования R_{ij} (определяет текущий состав КА j -го типа), помноженное на соответствующие коэффициенты технического уровня КА α_{ij} .

Выражение (8) является **уравнением состояния системы** ОГ КА и содержит описание связи между показателем состояния ОГ различного назначения, выраженным в виде значения ее текущей эффективности, и векторной функцией управления, представляющей собой распределение по времени числа КА различных типов, вводимых в эксплуатацию в составе соответствующих ОГ.

При установлении связи между функцией управления и полезностью ОГ (как интегральной характеристики ее эффективности в течение планового периода и за его пределами (5)) можно заметить следующее.

Если подставить выражение (8) в (5) и раскрыть суммирование, то получим, что члены сумм $u_{ij}(\tau) \cdot \alpha_{ij}$ повторяются, причем число повторений соответствует сроку активного существования КА R_{ij} , выраженному в годах. Таким образом, полезность ОГ КА i -го назначения, определяемая выражением (5), распадается на сумму полезности космических аппара-

⁶ Примерами таких показателей эффективности могут послужить производительность и периодичность наблюдения заданного района для ОГ разведки и картографии, пропускная способность и продолжительность сеанса связи и др.

⁷ В данном случае различные типы КА, составляющие одну ОГ в пределах программного периода, решают преимущественно одну совокупность задач и представляют собой КА различных поколений.



тов, выведенных до начала программного периода Π_i^0 , и полезности КА, выведенных в рамках мероприятий программного периода $\Pi_i^{\text{пр}}$:

$$\Pi_i = \Pi_i^0 + \Pi_i^{\text{пр}}, \quad (9)$$

причем последняя из них рассчитывается по формуле:

$$\Pi_i^{\text{пр}} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \left(\alpha_{ij} R_{ij} \sum_{t=1}^T u_{ij} \right)}{n_i^{\text{потр}} T}$$

Полезность КА (Π_i^0), выведенных до начала программного периода, является величиной постоянной и рассчитывается исходя из динамики убыли количественного состава ОГ при отсутствии программных мероприятий.

Если подставить выражение (9) в (4), то получим, что поскольку полезность КА, выведенных до начала программного периода входит в обе составляющие разностей $\Pi_i^* - \Pi_i$ выражения (4), то принятый показатель оптимальности $K_{КСВ}$ не зависит от полезности КА, выведенных до начала программного периода Π_i^0 . Таким образом, при расчете оптимальной программы развития ОГ КА полезность КА, введенных в эксплуатацию до начала программного периода, можно не учитывать. Поэтому для упрощения далее под Π_i будем понимать полезность КА, выводимых на орбиту в рамках программных мероприятий:

$$\Pi_i = \Pi_i^{\text{пр}} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \left(\alpha_{ij} R_{ij} \sum_{t=1}^T u_{ij} \right)}{n_i^{\text{потр}} T}. \quad (10)$$

Аналогично и при расчете полезности, соответствующей «идеальной» программе развития

$$\Pi_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \left(\alpha_{ij} R_{ij} \sum_{t=1}^T u_{ij}^* \right)}{n_i^{\text{потр}} T},$$

где $u_{ij}^* t$ - распределение КА, выводимых на ОИСЗ в соответствии с потребной программой развития.

Полезность ОГ обеспечивается вводом в эксплуатацию КА, создаваемых в рамках НИОКР⁸, и закупаемых серийно.

Далее рассмотрим подробнее *функцию управления*.

Функцией управления программы развития ОГ КА является векторная функция числа КА, вводимых в эксплуатацию:

$$u t = u_H t + u_C t, \quad (11)$$

где $u_H(t)$ – векторная функция количества вводимых в эксплуатацию КА, созданных в рамках НИОКР,

$u_C(t)$ – векторная функция количества КА вводимых в эксплуатацию, закупаемых серийно.

Поскольку изменение сроков выполнения НИОКР (и соответственно технологического цикла их выполнения и загруженности предприятий промышленности) нежелательно, то в таком случае необходимо зафиксировать сроки проведения НИОКР. Это, в свою очередь, фиксирует сроки ввода в эксплуатацию КА, выводимых для проведения летных испытаний и впоследствии вводимых в эксплуатацию, и распределение соответствующих финансовых средств по годам программного периода.

В рамках рассматриваемой методики ограничимся лишь определением оптимальной программы серийных закупок КА при фиксированной программе проведения НИОКР.

Вместе с директивным заданием сроков проведения НИОКР в данной методике зафиксируем и моменты времени перехода с одного типа (поколения) КА на другой. То есть закупки современного КА прекращаются после завершения НИОКР по созданию нового КА. В таком случае момент времени t однозначно определяет тип космического аппарата j , который возможно закупить в данном году для ввода в состав i -й ОГ.

⁸ Полагается, что КА, создаваемые в рамках НИОКР и выводимые на ОИСЗ для проведения летных испытаний, после их окончания вводятся в эксплуатацию в составе соответствующих ОГ.

Таким образом, при фиксированных сроках вывода на ОИСЗ КА, создаваемых в рамках НИОКР, **векторная функция управления**, по сути, представляет собой функцию серийных закупок КА $u_c t$.

Дополнительно отметим, что поскольку полезность КА, создаваемых в рамках НИОКР, входит и в уменьшаемое и вычитаемое разностей $\Pi_i^* - \Pi_i$ выражения (4), то при расчете полезностей i -й ОГ Π_i^* и Π_i будем учитывать только полезность КА, закупаемых серийно

$$\Pi_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \alpha_{ij} t R_{ij} t \sum_{t=1}^T u_{ij}^c t}{n_i^{\text{потр}} T},$$

$$\Pi_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \alpha_{ij} t R_{ij} t \sum_{t=1}^T u_{ij}^{c*} t}{n_i^{\text{потр}} T},$$

где $u_{ij}^{c*} t$ - распределение закупок КА, соответствующее потребной программе развития.

На функцию управления и состояние системы может накладываться **система ограничений**.

Типовыми ограничениями являются:
ограничения по предельному составу ОГ КА различного назначения;
ограничения по производственным мощностям предприятий промышленности;
ограничения по выделяемым ресурсам.

Цель введения ограничения по предельному составу заключается в пресечении возникновения ситуации, когда количество КА, находящихся на орбите $n_i t$, будет превышать потребное $n_i^{\text{потр}}$, поскольку данная ситуация приводит к перерасходу средств без получения должного эффекта.

Данное ограничение выражается в виде

$$n_i t = \sum_{j=1}^{m_i} n_{ij} t \leq n_i^{\text{потр}}. \quad (12)$$

Ограничение по производственным мощностям предприятий промышленности накладывается на управление и может

быть выражено в форме максимального количества КА j -го типа g_{ij} , которое может быть выпущено предприятием-производителем данного КА в год в рамках серийных закупок

$$u_{ij}^c t \leq g_{ij}. \quad (13)$$

Производственные мощности предприятий g_{ij} допустимо принять условно постоянными с течением времени.

Ограничение по производственным мощностям может быть введено как на каждый КА в отдельности (13), так и на совокупность КА. В частности, может быть наложено ограничение, связанное с возможностями предприятий промышленности по производству ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ), необходимых для выведения данных КА на рабочие орбиты. Однако, исходя из текущей ситуации, можно принять, что производственные мощности предприятий-производителей РН и РБ способны обеспечить любую программу запуска КА.

Ранее, при рассмотрении управляющей функции, было принято, что переход с закупки j -го типа КА на $(j+1)$ -й осуществляется в год, следующий за последним годом выполнения НИОКР по разработке $(j+1)$ -го типа КА. В таком случае ограничение по производству j -го КА представляется в виде:

$$u_{ij}^c t \leq u_{ij}^{\text{пром}} t = \begin{cases} 0, & \text{если } t < T_{ij}^{\text{НИОКР}}, \\ g_{ij}, & \text{если } T_{ij}^{\text{НИОКР}} < t \leq T_{i,j+1}^{\text{НИОКР}}, \\ 0, & \text{если } t > T_{i,j+1}^{\text{НИОКР}}, \end{cases} \quad (14)$$

где $T_{ij}^{\text{НИОКР}}$ - год окончания НИОКР по разработке j -го типа КА,

$T_{i,j+1}^{\text{НИОКР}}$ - год окончания НИОКР по разработке $(j+1)$ -го типа КА.

Ограничение по выделяемым ресурсам (ограничение на управление) обычно задается в виде общего объема финансовых средств $C_{\text{выд}}$, выделяемых на программный период T на мероприятия по развитию КСВ, и оказывает влияние через ограничение однозначно связанной с объемами закупок функции затрат:



$$C_{\text{НАКУ}} + C^H + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij}^C t \cdot u_{ij}^C t \leq C_{\text{выд}}, \quad (15)$$

где $C_{\text{НАКУ}}$ – суммарные затраты на развитие НАКУ КА за программный период,

C^H – суммарные затраты на проведение НИОКР по созданию КА и СВ за программный период,

$C_{ij}^C t$ – затраты на закупку одного КА j -го типа ОГ i -го назначения и РН с РБ к нему в t -м году.

Затраты на развитие НАКУ КА предлагается рассчитывать по формуле:

$$\sum_{t=1}^T C_{\text{НАКУ}} t = C_{\text{выд}} \cdot \lambda_{\text{НАКУ}}, \quad (16)$$

где $\lambda_{\text{НАКУ}}$ – доля финансовых средств, выделяемых на развитие НАКУ и ИКК, относительно общего объема средств (определяется по статистике).

В таком случае выражение (15) будет иметь вид:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij}^C t \cdot u_{ij}^C t \leq C_{\text{выд}} (1 - \lambda_{\text{НАКУ}}) - C^H. \quad (17)$$

Подводя итог вышесказанному, с учетом принятых при описании элементов задачи допущений, **сформулируем задачу расчета оптимальной программы развития КСВ** следующим образом.

Найти векторную функцию серийных закупок КА $u_c t$ на отрезке $t = 1, \dots, T$, которая доставляет минимум показателю

$$K_{\text{КСВ}} = \sum_{i=1}^m K_i = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot \Pi_i^* - \Pi_i^2, \quad (18)$$

при функциональных связях:

$$\Pi_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \left(\alpha_{ij} R_{ij} \sum_{t=1}^T u_{ij}^C t \right)}{n_i^{\text{потр}} T}, \quad (19)$$

ограничениях:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij}^C t \cdot u_{ij}^C t \leq C_{\text{выд}} (1 - \lambda_{\text{НАКУ}}) - C^H, \quad (20)$$

$$n_i t = \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{\tau=t-R+1}^{\tau=t} u_{ij}^0 \tau + u_{ij}^H \tau + u_{ij}^C \tau \leq n_i^{\text{потр}}, \quad (21)$$

$$u_{ij}^C t \leq u_{ij}^{\text{пром}} t, \quad (22)$$

и исходных данных, выраженных в:

характеристиках КА α_{ij} , R_{ij} , $C_{ij}^C t$ и ОГ $n_i^{\text{потр}}$, β_i ;

объеме средств, выделяемых на развитие КСВ $C_{\text{выд}}$ в рамках программного периода продолжительности T ;

динамике ввода в эксплуатацию КА, составляющих ОГ в момент времени $t = 1$, до начала программных мероприятий $u_{ij}^0 t$ (для $t < 1$);

распределении запусков КА, создаваемых в рамках НИОКР $u_{ij}^H t$

суммарных затратах на НИОКР $C^H t$ на создание КА и СВ и доле затрат на развитие НАКУ КА $\lambda_{\text{НАКУ}}$;

ограничениях по производственным мощностям предприятий промышленности $u_{ij}^{\text{пром}} t$;

известных потребных программах закупок КА орбитальных группировок различного назначения $u_{ij}^{C*} t$ и соответствующих им значениях полезностей Π_i^* .

Для поставленной задачи теории оптимального управления предлагается использовать прямой метод решения - метод максимального элемента (МЭ) [5, 6]. В [6] показано, что применительно к выпуклым вниз функциям K_i , составляющим аддитивную целевую функцию $K_{\text{КСВ}}$ (что имеет место в нашем случае), решение задачи минимизации на каждом шаге процесса расчета методом МЭ будет оптимально по отношению к текущему распределенному объему ресурса $C_{\text{расч}}^l$. Иными словами, процесс расчета по методу МЭ обеспечивает последовательность оптимальных относительно распределенного объема средств решений.

Основу метода МЭ составляет процесс последовательного пошагового распределения выделяемых средств (ресурса) по принципу выбора на каждом l -м шаге такого направления приращения функции закупок (закупка такого p -го типа КА q -й ОГ и в такой τ -й момент времени), которое обеспечивает наибольшую убыль критерия оптимальности $K_{\text{КСВ}}$, приходящегося на единицу ресурса

$$v_{qpr}^l = \max_t \max_i \max_j v_{ij}^l t, \quad (23)$$



где $v_{ij}^l t$ - значение убыли критерия оптимальности, отнесенного к стоимости одного КА j -го типа i -й ОГ и РН с РБ к

$$v_{ij}^l t = \frac{\Delta K_{ij}^l}{C_{ij}^C t} = \frac{K_i^l \left(\sum_{t=1}^T u_{ij}^{C l} t \right) - K_i^l \left(\sum_{t=1}^T u_{ij}^{C l} t + 1 \right)}{C_{ij}^C t}, \quad (24)$$

где ΔK_{ij}^l - величина убыли критерия оптимальности $K_{КСВ}$ на l -м шаге при увеличении количества закупаемых КА j -го типа i -й ОГ на единицу,

$K_i^l \left(\sum_{t=1}^T u_{ij}^{C l} t \right)$ - значение i -й составляющей критерия оптимальности $K_{КСВ}$ на l -м шаге распределения ресурсов.

Подставив (18) в (24) после преобразования получим выражение для значения критерия выбора направления приращения закупок для j -го КА i -й ОГ в t -м году на l -м шаге процесса распределения ресурса:

$$v_{ij}^l t = \frac{\beta_i \cdot \delta \Pi_{ij} \cdot 2 \Pi_i^* - \Pi_i^l - \delta \Pi_{ij}}{C_{ij} t}, \quad (25)$$

$$\delta \Pi_{ij} = \frac{\alpha_{ij} R_{ij}}{n_i^{\text{потр}} T} - \text{полезность одного } j\text{-го КА,}$$

входящего в состав i -й ОГ,

Π_i^l - полезность i -й ОГ на l -м шаге.

Соответственно для $(l+1)$ -го шага процесса новое значение управляющей функции определяется как

$$u_{ij}^{C l+1} t = \begin{cases} u_{ij}^{C l} t + 1, & \text{для } i = p \text{ и } j = q \text{ и } t = \tau, \\ u_{ij}^{C l} t, & \text{для } i \neq p \text{ или } j \neq q \text{ или } t \neq \tau. \end{cases}$$

Следует отметить, что получаемое методом МЭ решение может быть не оптимальным по отношению к выделенному объему средств $C_{выд}$. Источником погрешности решения задачи может послужить рассогласование распределенного и выделенного объемов финансовых средств. Однако стремление минимизировать невязку распределенных ресурсов относительно выделяемых $\Delta C = C_{выд} - C_{расп}$ объективно приведет к закупке экономически менее эффективных средств (имеющих низкое значение показателя v_{ij}) и при этом не гарантирует полное соответствие распределенных средств выде-

нему в t -м году на l -м шаге, который рассчитывается по формуле:

ляемым. В таком случае, поскольку максимально допустимая величина невязки ΔC не задана, то ограничимся таким ее значением, которое укладывается в рамках общего процесса расчета методом МЭ.

Таким образом, общий порядок решения задачи следующий:

1) Для каждого года программного периода для всех ОГ (для КА, закупаемых в соответствующих годах) рассчитываем значение показателя (25).

2) Выбираем из полученного массива показателей v_{ij}^l максимальный v_{qpr}^l , по соответствующей компоненте вектора закупок которой $u_{qp}^C t = \tau$ возможно приращение на один КА (удовлетворяются ограничения (21) и (22)). В случае отсутствия компонент вектора управления, удовлетворяющих условиям (21) и (22), расчеты завершаются.

3) Проверка условия не превышения стоимостью закупки одного КА и РН с РБ к нему $C_{qp}^C t = \tau$ (для выбранной в пункте 2 компоненты вектора управления $u_{qp}^C t = \tau$) остатка нераспределенных средств $C_{выд} - C_{расп}^l$. В случае выполнения условия увеличиваем на единицу указанную компоненту вектора управления $u_{qp}^C t = \tau$, прибавляем к объему распределенных к текущему шагу процесса средств $C_{расп}^l$ соответствующие затраты на закупку одного КА и РН с РБ к нему $C_{qp}^C t = \tau$ и переходим к пункту 1 (переход на следующий шаг процесса расчета). Если условие не выполняется, то расчеты завершаются.

По окончанию процесса расчета мы получаем динамику состава ОГ по времени и оптимальную относительно распределенного объема средств и для принятых допущений



программу развития КСВ, удовлетворяющую системе ограничений, а также распределение средств по годам и ОГ КА различного назначения, соответствующее найденной программе.

Представленный порядок отражает лишь общую схему применения метода МЭ для рассматриваемой задачи и требует более точного и развернутого описания, которое представлено ниже.

Алгоритм решения задачи⁹.

I этап. Подготовка исходных данных.

1.1. Уточнение разделения ОГ по назначению. Назначение (или расчет) значений весовых коэффициентов важности ОГ КА различного назначения β_i .

1.2. Уточнение типажа КА, составляющих различные ОГ, их САС R_{ij} , ТТХ и стоимостей $C_{ij}^{КА} t$, а также стоимостей РН $C_{ij}^{РН} t$ и РБ $C_{ij}^{РБ} t$ к ним. Расчет стоимостей $C_{ij}(t)$ по формуле:

$$C_{ij} t = C_{ij}^{КА} t + C_{ij}^{РН} t + C_{ij}^{РБ} t .$$

Определение (расчет или назначение) коэффициентов технического уровня КА α_{ij} .

1.3. Уточнение состава ОГ на начало программного периода, а также сроков ввода в эксплуатацию КА, составляющих данные ОГ $u_{ij}^0 t$.

1.4. Уточнение перечня НИОКР по созданию КА и СВ, выполняемых в программном периоде, сроков их проведения и моментов запуска КА $u_{ij}^H t$, создаваемых в рамках данных НИОКР. Расчет объема средств, потребных для проведения данной совокупности НИОКР C^H .

Уточнение доли средств, выделяемых на развитие НАКУ КА $\lambda_{НАКУ}$.

1.5. Определение объема средств, выделяемых на проведение серийных закупок КА и РН с РБ к ним

$$C_C = C_{выд} \cdot 1 - \lambda_{НАКУ} - C^H .$$

1.6. Определение вектора ограничений по производственным мощностям предприятий $u_{ij}^{пром} t$ (по формуле (14)).

1.7. Расчет «идеальной точки» (компонент вектора «идеальной» полезности, соответствующих потребной программе развития Π_i^* для всех ОГ).

1.7.1. Последовательное построение для каждого года программного периода от 1 до T -го для i -й ОГ потребной программы серийных закупок КА $u_{ij}^{C*} t$.

1.7.1.1. Определение состава i -й ОГ для t -го года с учетом закупок КА $u_{ij}^{C*} t$ с 1-го до $(t-1)$ -го года

$$n_i' t = \sum_{j=1}^{m_i} \left(\sum_{\tau=t-R+1}^{\tau=t} u_{ij}^0 \tau + u_{ij}^H \tau + \sum_{\tau=t-R+1}^{\tau=t-1} u_{ij}^{C*} \tau \right) .$$

1.7.1.2. Определение количества КА, потребного для доукомплектования i -й ОГ в t -м году

$$u_i^{потр} t = \begin{cases} n_i^{потр} - n_i' t , & \text{если } n_i^{потр} - n_i' t > 0, \\ 0, & \text{если } n_i^{потр} - n_i' t \leq 0. \end{cases}$$

1.7.1.3. Определение для t -го года потребного объема закупок КА

$$u_{ij}^{C*} t = \max u_{ij}^{пром} t , u_i^{потр} t .$$

1.7.2. Расчет полезности i -й ОГ для «идеальной» траектории (потребной программы) развития $u_{ij}^{C*} t$, рассчитанной в п. 1.7.1

$$\Pi_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \left(\alpha_{ij} R_{ij} \sum_{t=1}^T u_{ij}^{C*} t \right)}{n_i^{потр} T} .$$

II этап. Расчет оптимальной программы развития.

2.1. Присвоение начальных значений основным переменным многошагового процесса расчета

$l=1$ – номер шага процесса расчета,

$u^C t = 0$ – вектор закупок КА,

$\Pi^l = 0$ – вектор полезности на l -м шаге с координатами Π_i^l ,

$C_{расп}^l = 0$ – значение распределенного объема средств на l -м шаге.

2.2. Определение количественного состава для всех ОГ ($i=1, \dots, m$) на интервале планирования ($1 \leq t \leq T$)

⁹ Пункты алгоритма выполняются последовательно, за исключением случаев, когда в пункте указан условный переход.



$$n_i^t = \sum_{j=1}^{m_i} n_{ij}^t = \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{\tau=t-R+1}^{\tau=t} u_{ij}^0 t + u_{ij}^H \tau + u_{ij}^C \tau .$$

2.3. Определение количества КА, необходимого для доукомплектования состава каждой ОГ до потребного по годам программного периода

$$u_i^{\text{потр}} t = \begin{cases} n_i^{\text{потр}} - n_i^t, & \text{если } n_i^{\text{потр}} - n_i^t > 0, \\ 0, & \text{если } n_i^{\text{потр}} - n_i^t \leq 0. \end{cases}$$

2.4. Определение допустимого объема закупок КА (для всех ОГ на интервале планирования)

$$u_{ij}^{\text{доп}} t = u_{ij}^{\text{пром}} t - u_{ij}^C t .$$

2.5. Расчет массива ограничений по закупкам (для всех ОГ на интервале планирования)

$$v_{ij}^l t = \begin{cases} \beta_i \cdot \frac{\frac{\alpha_{ij} \cdot R_{ij}}{n_i^{\text{потр}} T} \left(2 \Pi_i^* - \Pi_i^l - \frac{\alpha_{ij} \cdot R_{ij}}{n_i^{\text{потр}} T} \right)}{C_{ij} t}, & \text{если } u_{ij}^{\text{рп}} t > 0, \\ 0, & \text{если } u_{ij}^{\text{рп}} t = 0. \end{cases}$$

2.8. Определение года τ закупки p -го типа КА q -й ОГ, которым соответствует максимальное значение критерия $v_{ij}^l t$

$$v_{pq\tau}^l = \max_t \max_i \max_j v_{ij}^l t .$$

2.9. Проверка условия превышения объема распределенных средств относительно выделенных на закупки

$$\Delta = C_C - C_{\text{расп}}^l + C_{pq} t = \tau ,$$

где $C_{pq} t = \tau$ - стоимость одного КА и РН с РБ к нему для выбранного в п.2.7. p -го типа КА q -й ОГ в τ -м году.

Если $\Delta > 0$, то выполняется переход к пункту 2.10.

Если $\Delta \leq 0$, то выполняется переход к пункту 2.15.

2.10. Увеличение количества закупаемых КА p -го типа q -й ОГ в τ -м году на единицу

$$u_{pq}^C t = \tau := u_{pq}^C t = \tau + 1^{10} .$$

2.11. Переход на новый шаг (присвоение нового значения переменной номера шага)

$$u_{ij}^{\text{рп}} t = \min u_{ij}^{\text{доп}} t , u_i^{\text{потр}} t .$$

2.6. Проверка условия существования хотя бы одного допустимого направления приращения вектора закупок

$$u^{\text{рп}} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^m u_i^{\text{рп}} t .$$

Если $u^{\text{рп}} > 0$, то выполняется переход к пункту 2.7. В противном случае выполняется переход к пункту 2.15.

2.7. Расчет массива значений критерия выбора направления приращения вектора закупок на l -м шаге (для всех ОГ на интервале планирования)

$$l := l + 1 .$$

2.12. Расчет значения полезности q -й ОГ на l -м шаге

$$\Pi_q^l = \Pi_q^{l-1} + \frac{\alpha_{qp} \cdot R_{qp}}{n_q^{\text{потр}} T} .$$

2.13. Расчет объема распределенных средств на l -м шаге

$$C_{\text{расп}}^l = C_{\text{расп}}^{l-1} + C_{pq} t = \tau .$$

2.14. Переход к пункту 2.2.

2.15. Завершение расчета. Вывод результатов расчета.

По окончании процесса расчета (пункт 2.15 алгоритма) получаем оптимальную для распределенного объема средств $C_{\text{расп}}$ программу закупок КА $u^C t$. При необходимости можно рассчитать дополнительные показатели и характеристики полученной программы развития ОГ КА, как, например, динамику состава ОГ различного назначения (выражение (7)), программу закупок ракетносителей и разгонных блоков или распределение средств между частными ОГ, КА и ОГ в целом, средствами выведения.

¹⁰ Здесь и далее символ «:=» означает операцию присвоения нового значения переменной, стоящей слева от символа «:=», в соответствии с выражением, стоящим справа от него.

Области применения методического аппарата, его преимущества и недостатки

Назначение разработанного методического аппарата расчета оптимальной программы развития КСВ можно определить следующим:

- получение опорного варианта развития системы КСВ для лица, принимающего решение;

- получение нулевого приближения для решения задачи определения оптимальной программы развития в более сложной постановке (что будет особенно ценно в случае многоэкстремальности целевой функции оптимизации, когда наличие хорошего нулевого приближения является серьезным подспорьем при решении задачи).

Основным преимуществом предлагаемого метода решения задачи поиска оптимальной программы развития является его простота и, как следствие, высокое быстродействие в случае реализации вычислительного процесса на ЭВМ.

Еще одной положительной стороной метода является возможность учета достаточно большого количества ограничений (например, на производственные мощности предприятий-изготовителей ракет-носителей, выделяемые ресурсы на каждый отдельный год программного периода и др.) без существенного усложнения процесса расчета.

Среди недостатков следует отметить общие для экспертных методов недостатки, заключающиеся в субъективности и приближенности полученных результатов.

Кроме того, в разработанном методе отсутствует возможность в рамках единого вычислительного процесса осуществлять полноценное управление НИОКР. Следует отметить, что частичное управление НИОКР все же возможно, но на основе экспертного

подхода, путем итерационного изменения совокупности НИОКР, включаемых в перечень программных мероприятий на этапе 1.4 алгоритма расчета, и оценки полученного результата (в том числе и с использованием критерия (18)) с последующей корректировкой перечня НИОКР на следующей итерации.

Ограничения по применению методики определяются допустимостью принятых в методике допущений, основными из которых являются:

- риски реализации программных мероприятий малы, что позволяет их не учитывать при определении оптимальной программы развития КСВ;

- требования к ОГ в целом и к КА в частности постоянны в течение программного периода;

- эффективность функционирования ОГ КА различного назначения пропорциональна количественному составу данной орбитальной группировки.

В соответствии с указанными недостатками и основными допущениями можно сформулировать возможные направления совершенствования разработанной методики:

1. Разработка подходов по оценке рисков и их учету в методическом аппарате, а также учету надежности техники.

2. Уточнение и повышение объективности оценки эффективности функционирования как КА в отдельности, так и ОГ в целом (в том числе на основе интегрального критерия высокого уровня с учетом возможностей и степени развития НАКУ КА и потребителей информационного обеспечения КСВ).

3. Учет динамики системы требований к КСВ.

4. Разработка подходов к оценке потенциала НИОКР, позволяющих объективно обосновывать целесообразность и рациональные сроки их проведения.

Список использованных источников

1. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем.– М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974.
2. Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов. – М.: «Владмо», 2003.
3. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. – РАН/Институт прикладной физики.– Нижний Новгород: 1994.
4. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS EXCEL.– СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
5. Триус Е.Б. Задачи математического программирования транспортного типа.– М.: «Сов.радио», 1967.
6. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем.– М.: «Сов.радио», 1974.

