

УДК: 629.78

Анализ возможности снижения риска реализации проекта космической системы в планируемый период

Ламзин В.А., Ламзин В.В.*.

Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail:8916846583@mail.ru*

Аннотация

При разработке космической системы (КС) процесс принятия проектных решений обычно носит многоуровневый, иерархический характер и проходит в условиях значительной неопределенности исходной информации. В статье предложена методика, позволяющая провести эффективное уточнение проектного решения КС дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при модернизации в планируемый период с целью снижения риска реализации системы. Рассматривается модельная задача исследования характеристик оптико-электронной КС ДЗЗ в планируемый период с учетом особенностей проектно-конструкторских решений для подсистем и при наличии случайных неконтролируемых факторов. При решении задачи используются адаптивные проектные модели и статистический метод согласованной двухуровневой оптимизации параметров. Исследуются возможности разработанной методики, приведены оценки точности решения и риска реализации проекта космической системы.

Ключевые слова: космическая система, дистанционное зондирование Земли, неопределенность, проектное решение, многоуровневый процесс, двухуровневая модель

Введение

На современном этапе развития ракетно-космической техники (РКТ) и космических технологий при определении путей повышения их эффективности используются методы комплексного технико-экономического анализа. Методы подобного анализа перспективной техники непрерывно совершенствуются, что связано, прежде всего, с новыми направлениями технического и технологического её развития, с изменением задач технико-экономических исследований. Кроме того, как показано в работах[1,2], разработка таких объектов РКТ, как космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), проводится в условиях значительной неопределенности и связана с большими затратами. Это усложняет принятие проектных решений. Ошибка при проектировании может привести к огромным материальным потерям и другим негативным моментам. В связи с этим появляется проблема создания методов оценки проектных решений, учитывающих влияние неопределенностей и позволяющих минимизировать возможный проигрыш (риск), обеспечить требуемую точность решений и повысить эффективность эксплуатации космических систем при ограниченных затратах. Как пример упомянутого выше анализа в данной статье рассматривается задача оценки технико-экономических характеристик КС ДЗЗ при наличии неопределенностей. Особенностью задачи является учёт проектно-конструкторских решений (ПКР)

подсистем космического аппарата (КА), использование адаптивных моделей, применение приёма декомпозиции решения. Предполагается, что неопределенность решения задачи обусловлена только незнанием коэффициентов проектной модели. В таком случае задача исследования может быть сформулирована как задача стохастического программирования.

Постановка задачи

Состав исследуемой КС ДЗЗ представляется в виде комплекса основных подсистем: космического и наземного сегментов. В состав космического (орбитального) сегмента входит КА ДЗЗ, состоящий из двух модулей [3]. Первый модуль - целевая аппаратура (МЦА), второй - унифицированная космическая платформа (УКП). Наземный сегмент включает ракетно-космический комплекс (РКК*) из состава которого выведен КА, наземный комплекс управления (НКУ) и наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР). При проведении исследований КС ДЗЗ предполагается, что параметры наземного сегмента заданы и известна программа реализации проекта КС ДЗЗ (количество типов, сроки разработки, создания (изготовления) и эксплуатации КА).

Для проведения анализа возможности повышения достоверности оценки технико-экономических характеристик и снижения риска реализации проекта КС ДЗЗ в планируемый период при проведении проектных исследований рассмотрим модельную задачу оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КА в составе КС ДЗЗ с учетом особенностей проектно-конструкторских решений (ПКР) для подсистем модуля МЦА. Предполагается, что космическая система включает КА

с оптико-электронной целевой аппаратурой видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов на борту и решает ряд задач тематического картографирования, сельского и лесного хозяйства.

Постановка задачи: при заданных параметрах наземного сегмента, целевой нагрузке и программе реализации проекта оценить технико-экономические характеристики КА в составе КС ДЗЗ при реализации к заданному моменту времени с учетом особенностей ПКР подсистем модуля МЦА на адаптивных моделях. Исследовать влияние особенностей ПКР подсистем модуля МЦА на технико-экономические характеристики КА и КС ДЗЗ, оценить риск реализации проекта системы.

При решении задачи используется двухуровневая модель управления разработкой [4]. Проектные исследования охватывают верхний ($i-1$) и нижний (i) уровни управления разработкой. На верхнем уровне управления разработкой КА рассматривается как объект, включающий два модуля: МЦА и УКП. Предполагается, что параметры модуля УКП известны, а проектный анализ проводится только для модуля МЦА. На нижнем уровне проводится детальный проектный анализ МЦА с учетом особенностей ПКР его подсистем: целевой съёмочной системы (ЦСС), системы сбора и передачи информации (ССПИ), системы терморегулирования (СТР) и конструкции. Схема оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КА в составе КС ДЗЗ с учетом особенностей ПКР модуля МЦА при двухуровневой модели управления разработкой приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема оценки технико-экономических характеристик КА

Алгоритм исследования включает последовательное решение следующих задач: оптимизация (оценка) технико-экономических характеристик КА в составе КС ДЗЗ к моменту t_i ; оптимизация (оценка) характеристик модуля МЦА при заданных функциональных и параметрических связях; направленная адаптация проектной модели КА. Ниже приведены постановки выделенных задач и алгоритмы их решения.

Задача оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КА в составе КС ДЗЗ к моменту t_i .

Постановка задачи: при заданных параметрах наземного сегмента ${}^{i-1}P_{HC}(\cdot)$ и модуля УКП ${}^{i-1}P_{УКП}(\cdot)$, целевой нагрузке $C(t_i)$ и программе реализации проекта системы $PR(t)$ определить технико-экономические характеристики КА ${}^{i-1}P_{КА}(\cdot)$ такие, чтобы эффективность, надежность и информационная производительность КА были не меньше, а массогабаритные характеристики аппарата не больше заданных, и приведенные суммарные затраты средств на реализацию проекта создания КА ДЗЗ ${}^{i-1}C_{\Sigma КА}$ были минимальными.

Формально математическую постановку задачи можно представить в виде

$${}^{i-1}C_{\Sigma_{KA}} ({}^{i-1}C_{MЦА} ({}^{i-1}П_{КА} (\cdot), {}^{i-1}\beta(t_i)) + {}^{i-1}C_{УКП} ({}^{i-1}П_{УКП} (\cdot))) \rightarrow \min_{{}^{i-1}П_{КА} (\cdot) \in {}^{i-2}G_{КА} (t_i)} \quad (1)$$

$${}^{i-1}I_{ПР_{КА}} ({}^{i-1}П_{КА} (\cdot), {}^{i-1}П_{НС} (\cdot), \Psi(t_i)) \geq I_{ПР_{КА}}^{зд}; \quad {}^{i-1}W_{КА} ({}^{i-1}I_{ПР_{КА}} (\cdot), \Psi(t)) \geq W_{КА}^{зд}; \quad {}^{i-1}П_{НС} (\cdot) = П_{НС}^{зд};$$

$${}^{i-1}M_{КА} ({}^{i-1}П_{КА} (t)) = M_{КА}^{зд}; \quad {}^{i-1}P_{КА} ({}^{i-1}M_{КА} (\cdot)) \geq P_{КА}^{зд}; \quad {}^{i-1}C_{УКП} = C_{УКП}^{зд}; \quad {}^{i-1}П_{УКП} = П_{УКП}^{зд};$$

$${}^{i-1}M_{УКП} ({}^{i-1}П_{УКП}) = M_{УКП}^{зд}; \quad {}^{i-1}\Gamma_{УКП} = \Gamma_{УКП}^{зд}; \quad t_i \in \langle T \rangle.$$

где ${}^{i-1}C_{MЦА} (\cdot)$ - суммарные приведенные затраты средств на реализацию проекта создания модуля МЦА на $i-1$ -м уровне управления разработкой; ${}^{i-1}I_{ПР_{КА}} (\cdot)$ - информационная производительность КА на $i-1$ -м уровне управления разработкой; ${}^{i-1}W_{КА} (\cdot)$ - целевая эффективность КА, определяется рядом показателей, например, количеством спектральных каналов $N_{кан}$ ЦСС, диапазоном длин волн $\Delta\lambda$, полосой захвата ΔL и разрешением R спектрального канала, и др.; ${}^{i-1}M_{КА} (\cdot)$ - масса КА на $i-1$ -м уровне управления разработкой; ${}^{i-1}P_{КА} (\cdot)$ - функция, определяющая надежность (вероятность безотказной работы (ВБР)) КА на $i-1$ -м уровне управления разработкой; ${}^{i-1}C_{УКП} (\cdot), {}^{i-1}M_{УКП} (\cdot), {}^{i-1}\Gamma_{УКП}$ - соответственно, суммарные приведенные затраты, масса и габариты модуля УКП на $i-1$ -м уровне управления разработкой; ${}^{i-1}G_{КА} (t_i)$ - область допустимых решений, определяемая функциональными связями (внешними и внутренними) на $i-1$ -м уровне управления разработкой; ${}^{i-1}\beta(t)$ - вектор определяющих параметров, коэффициентов стоимостных зависимостей, которые определяются на основе опытных данных; t_i - текущее время реализации проекта КА; $\langle T \rangle$ - планируемый период реализации КС ДЗЗ; индекс $зд$ – заданные значения параметров или функций. Остальные обозначения приведены в формулировке задачи

(1). На рис. 2 приведена укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КА в составе КС ДЗЗ к моменту t_i .

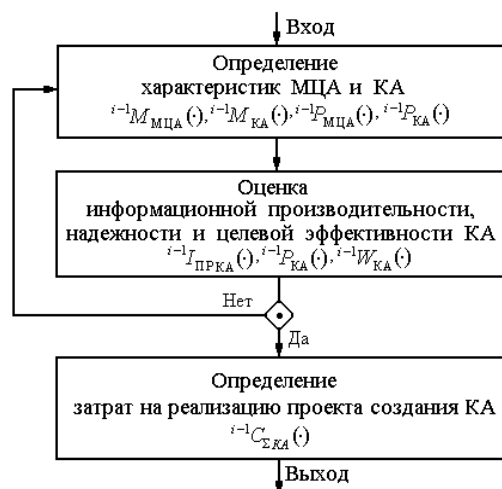
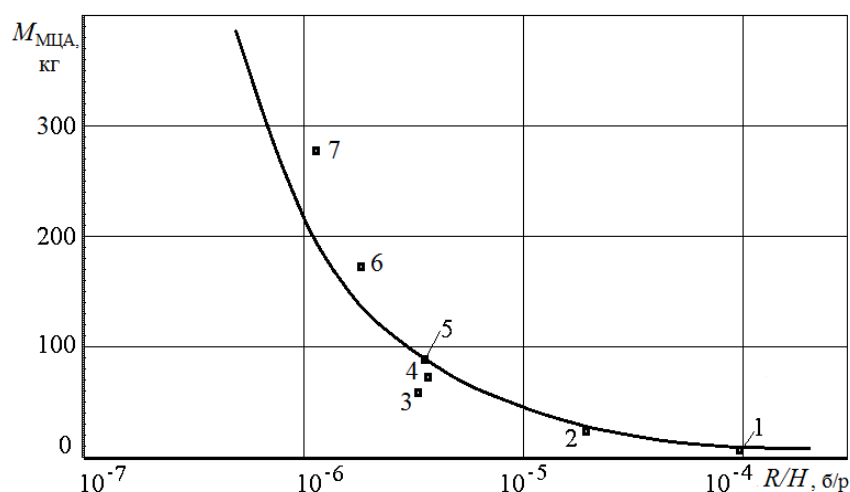


Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КА

При решении задачи (1) используется проектная модель, включающая аппроксимирующие зависимости для оценки технико-экономических характеристик КА и МЦА на $i-1$ -м уровне управления разработкой. При определении аппроксимирующих зависимостей используются метод регрессионного анализа апостериорной (статистической) информации. Для реализации данного метода используется последовательность расчета, приведенная в работе [5] и включающая оценку исходных данных, выбор формы связи и расчет коэффициентов аппроксимирующих зависимостей с помощью метода наименьших квадратов. В частности, для определения аппроксимирующей зависимости массы МЦА $M_{\text{МЦА}}$ от относительного параметра R/H (где R - наилучшее пространственное разрешение ЦСС и H - высота круговой орбиты КА) (рис. 3), использовались статистические данные (модельные значения) прототипов КА ДЗЗ, приведенные в табл. 1.

Статистические данные прототипов КА ДЗЗ

Номер КА	Масса МЦА $M_{\text{МЦА}}$, кг	Масса КА $M_{\text{КА}}$, кг	Высота орбиты H , км	Пространственное разрешение ЦСС (наилучшее) R , м	Относительный параметр R/H , б/р
1	6,8	150	835	191	$2,290 \times 10^{-4}$
2	25,3	129	650	12	$1,846 \times 10^{-5}$
3	58,5	400	580	1,9	$3,333 \times 10^{-6}$
4	70,2	380	450	1,7	$3,773 \times 10^{-6}$
5	67,7	130	690	2,5	$3,623 \times 10^{-6}$
6	175,0	750	510	0,95	$1,851 \times 10^{-6}$
7	280,0	680	630	1,0	$1,574 \times 10^{-6}$

Рис. 3. Зависимость массы модуля МЦА $M_{\text{МЦА}}$ от относительного параметра R/H

Форма связи массы модуля МЦА $M_{\text{МЦА}}$ от параметра R/H имеет вид:

$M_{\text{МЦА}} = M_0 \cdot (R/H)^{\alpha_1}$, где M_0 и α_1 - статистические коэффициенты ($M_0 = 0,019$ и $\alpha_1 = -0,676$ при $2,29 \cdot 10^{-4} \leq R/H \leq 3,773 \cdot 10^{-6}$ и $6,8 \leq M_{\text{МЦА}} \leq 280$). Остальные зависимости

для расчёта габаритно-массовых характеристик представляются в виде

$$M_{\text{КА}} = M_{\text{МЦА}} + M_{\text{УКП}}; \Gamma_{\text{КА}}(V_{\text{КА}}^*(\cdot)); V_{\text{КА}}^* = M_{\text{КА}} / \rho_{\text{КА}}^*; \Gamma_{\text{МЦА}} = \Gamma_{\text{КА}}(V_{\text{КА}}^*(\cdot)) - \Gamma_{\text{УКП}}.$$

Зависимости для определения информационной производительности и надёжности, полученные путем обработки статистических данных, имеют вид

$$I_{\text{пр КА}} = 695,2 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,0321} \cdot (R/H)^{0,0568}$$

при $2,96546 \cdot 10^{-6} \leq R/H \leq 4,768 \cdot 10^{-6}$ и $53,199 \leq M_{\text{МЦА}} \leq 98,797$;

$$P_{\text{КА}} = P_{\text{МЦА}} \cdot P_{\text{УКП}} ; P_{\text{МЦА}} = 1 - 0,592 \cdot e^{-0,01 \cdot M_{\text{МЦА}}} \quad (50 \leq M_{\text{МЦА}} \leq 550) ; P_{\text{УКП}} = 0,962 \quad (T_{\text{САС}} = 5).$$

Основные экономические соотношения:

$$C_{\Sigma \text{КА}} = (C_{\text{РКА}}^1(\cdot) \cdot \eta(\tau_{\text{пр1}}) + f(N_{\text{КА}}) \cdot \eta(\tau_{\text{пр2}})) \cdot C_{\text{СКА}}^1(\cdot) ; C_{\text{СКА}}^1(\cdot) = C_{\text{СМЦА}}^1(\cdot) + C_{\text{СУКП}}^1(\cdot) ; C_{\text{РКА}}^1(\cdot) = C_{\text{СКА}}^1(\cdot) \cdot k_p^* \cdot N_p,$$

где k_p^* - базовый коэффициент, определяющий связь затрат на разработку и производство первого образца изделия (проведенный анализ показал, что его значение зависит от особенностей КА и по статистическим данным составляет $k_p^* = 2 - 13$), N_p - приведенное число КА на этапе разработки.

Форма связи затрат на изготовление 1-го базового образца модуля МЦА $C_{\text{СМЦА}}^1$ от его массы $M_{\text{МЦА}}$ имеет вид: $C_{\text{СМЦА}}^1 = C1 \cdot M_{\text{МЦА}}^{\alpha_2}$, где $C1$ и α_2 - статистические коэффициенты ($C1 = 3,528$ и $\alpha_2 = 0,614$ при $2,29 \cdot 10^{-4} \leq R/H \leq 3,773 \cdot 10^{-6}$ и $6,8 \leq M_{\text{МЦА}} \leq 280$).

$$C_{\text{СУКП}}^1 = 0,18 \cdot M_{\text{УКП}}^{1,025} \quad (50 \leq M_{\text{УКП}} \leq 500).$$

В приведенных зависимостях размерность массы M - кг, высоты орбиты H - км, пространственного разрешения R - м, затрат средств C - млн.р., габаритных размеров Γ - м, объема $V - \text{м}^3$, плотности ρ - $\text{кг}/\text{м}^3$, $\tau_{\text{пр}}$ и $T_{\text{САС}}$ - годы.

Результаты решения задачи (1). При периодичности наблюдения $T_{\text{н}} = 12$ суток и широте наблюдения $\varphi = \pm 41,2$ градуса, с которых покрывается поверхность

Земли, выбран вариант солнечно-синхронной орбиты (ССО), при котором её высота H составила 561 км, наклонение - $i = 97,586$ градусов. Тогда, при значении пространственного разрешения R равном 2 м, значение относительного параметра R/H составит $3,565 \cdot 10^{-6}$. С использованием моделей $i-1$ -го уровня проведены оценки массы и затрат средств на КА и его подсистемы. Для ${}^{i-1}M_{\text{УКП}} = 261$ кг значение ${}^{i-1}M_{\text{МЦА}} \approx 92,0$ кг и ${}^{i-1}M_{\text{КА}} = 91,5 + 261,0 = 353$ кг, ${}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1 \approx 56,7$ млн.р., ${}^{i-1}C_{\text{СУКП}}^1 \approx 54,0$ млн.р., ${}^{i-1}C_{\text{СКА}}^1(\cdot) = 106,7$ млн.р.

Задача оптимизации (оценки) характеристик модуля МЦА при заданных функциональных и параметрических связях. Постановка задачи: при заданном типе ЦСС и значениях параметров $(\Delta\lambda, N_{\text{кан}}, R, \Delta L)$ определить характеристики подсистем ${}^i\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot)$ модуля МЦА такие, чтобы затраты средств на его разработку и создание (изготовление) ${}^iC_{\text{МЦА}}(\cdot)$ были минимальными. Формально математическую постановку задачи можно представить в виде

$${}^iC_{\text{МЦА}}\left({}^i\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), {}^i\beta(t_i)\right) \rightarrow \min_{{}^i\Pi_{\text{МЦА}} \in {}^iG_{\text{МЦА}}\left(t_i, {}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot)\right)} \quad (2)$$

при выполнении функциональных и параметрических ограничений:

$$\begin{aligned} & {}^i\Delta\lambda = {}^{i-1}\Delta\lambda^{\text{зд}}; \quad {}^iN_{\text{кан}} = {}^{i-1}N_{\text{кан}}^{\text{зд}}; \quad {}^iR_k = {}^{i-1}R_k^{\text{зд}} \quad (k = \overline{1, N_{\text{кан}}}); \quad {}^i\Delta L_j = {}^{i-1}\Delta L_j^{\text{зд}} \quad (j = \overline{1, 2}); \quad {}^i\Gamma_{\text{КА}}({}^iV_{\text{КА}}^*) \leq {}^{i-1}\Gamma_{\text{КА}}^{\text{зд}}; \\ & {}^iI_{\text{ПРКА}}({}^i\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), \dots) \geq {}^{i-1}I_{\text{ПРКА}}^{\text{зд}}; \quad {}^iM_{\text{МЦА}}({}^i\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot)) \leq {}^{i-1}M_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}; \quad {}^iP_{\text{МЦА}}({}^iM_{\text{МЦА}}) \geq {}^{i-1}P_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}; \quad {}^i\Pi_{\text{УКП}} = {}^{i-1}\Pi_{\text{УКП}}^{\text{зд}}; \\ & {}^iM_{\text{УКП}}({}^i\Pi_{\text{УКП}}) = {}^{i-1}M_{\text{УКП}}^{\text{зд}}; \quad {}^iP_{\text{УКП}}({}^iM_{\text{УКП}}) = {}^{i-1}P_{\text{УКП}}^{\text{зд}}; \quad {}^iW_{\text{УКП}}({}^iM_{\text{УКП}}) = {}^{i-1}W_{\text{УКП}}^{\text{зд}}; \quad {}^i\Gamma_{\text{УКП}}({}^iV_{\text{УКП}}) = {}^{i-1}\Gamma_{\text{УКП}}^{\text{зд}}. \end{aligned}$$

Укрупненная блок-схема алгоритма оценки характеристик модуля МЦА при заданных функциональных и параметрических связях (i -й уровень управления разработкой) приведена на рис. 4.

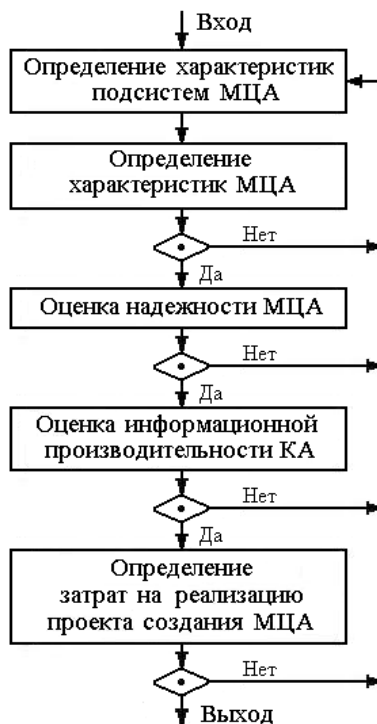


Рис.4. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров МЦА

Так как характеристики модуля УКП заданы, то формирование моделей оценки габаритно-массовых и энергетических характеристик, а также характеристик надежности и затрат на i -м уровне управления разработкой проводится подробно только для МЦА. Зависимости для расчёта габаритно-массовых характеристик, модуля МЦА имеют вид

$$M_{\text{МЦА}} = \sum_{k=1}^4 M_{\text{МЦА}_k}(\cdot); \Gamma_{\text{МЦА}} = \Gamma_{\text{КА}}(V_{\text{КА}}^*) - \Gamma_{\text{УКП}}; V_{\text{КА}}^* = M_{\text{КА}} / \rho_{\text{КА}}^*;$$

$$W_{\text{МЦА}} = \sum_{k=1}^4 W_{\text{МЦА}_k}; P_{\text{МЦА}} = \prod_{k=1}^4 M_{\text{МЦА}_k}; M_{\text{ЦСС}} = 8,608 \cdot 10^{-5} \cdot (R/H)^{-1.0387};$$

$$M_{\text{ССПИ}} = M_{\text{БУСИ}} + M_{\text{РКПИ}}; M_{\text{БУСИ}} = k_{\text{БУСИ}} \cdot M_{\text{МЦА}}; M_{\text{РКПИ}} = M_{\text{ФПРД}} + M_{\text{АФУ}} + M_{\text{пр}};$$

$$M_{\text{ФПРД}} = 1,2 + 1,1 \cdot 10^{-1} \cdot P_{\text{ПРД}} \text{ (S-диапазон длин волн)}; M_{\text{ФПРД}} = 1,4 + 2,6 \cdot 10^{-1} \cdot P_{\text{ПРД}} \text{ (X-диапазон)};$$

$$M_{\text{СТР}} = 0,0765 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,834}; M_{\text{Кон}} = 0,211 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,895};$$

Зависимости для определения мощности энергопотребления и надёжности для подсистем ЦСС, ССПИ, СТР и конструкции имеют вид

$$W_{\text{ПЦСС}} = 3461 \cdot e^{0,014 \cdot M_{\text{МЦС}}} \text{ (} 14 \leq M_{\text{ЦСС}} \leq 100 \text{)}; P_{\text{ЦСС}} = 1 - 0,455 \cdot e^{-0,0588 \cdot M_{\text{ЦСС}}} \text{ (} 14 \leq M_{\text{ЦСС}} \leq 120 \text{)};$$

$$W_{\text{ПССПИ}} = W_{\text{ПБУСИ}} + W_{\text{ПРКПИ}}; W_{\text{ПБУСИ}} = 14,5 \cdot e^{0,041 \cdot M_{\text{БУСИ}}}; W_{\text{ПРКПИ}} = 10,0 + 4 \cdot P_{\text{ПРД}} \text{ (S-диапазон)};$$

$$W_{\text{ПРКПИ}} = 8,0 + 8,4 \cdot P_{\text{ПРД}} \text{ (X-диапазон)}; P_{\text{ССПИ}} = 1 - 0,254 \cdot e^{-0,096 \cdot M_{\text{ССПИ}}} \text{ (} 15 \leq M_{\text{ЦСС}} \leq 35 \text{)};$$

$$P_{\text{ССПИ}} = 1 - 0,106 \cdot e^{-0,052 \cdot M_{\text{ССПИ}}} \text{ (} 9 \leq M_{\text{ССПИ}} \leq 70 \text{)}; W_{\text{ПСТР}} = 16,3 \cdot e^{0,059 \cdot M_{\text{СТР}}} \text{ (} 1,5 \leq M_{\text{СТР}} \leq 15 \text{)};$$

$$P_{\text{СТР}} = 1 - 0,214 \cdot e^{-1,167 \cdot M_{\text{СТР}}} \text{ (} 1,5 \leq M_{\text{СТР}} \leq 7 \text{)}; P_{\text{Кон}} = 1 - 0,448 \cdot e^{-0,605 \cdot M_{\text{Кон}}} \text{ (} 5 \leq M_{\text{Кон}} \leq 17 \text{)}.$$

Зависимость для определения информационной производительности за один сеанс связи с НКПОР представляется в виде: $I_{\text{ПРКА}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m N_{\text{Кij}} \cdot S_{\text{Кij}}^1$, где $N_{\text{Кij}}$ - количество кадров на маршруте; $S_{\text{Кij}}^1$ - площадь поверхности Земли 1-го кадра.

Основные экономические соотношения:

$$C_{\text{СМЦА}}^1 = \sum_{j=1}^4 C_{\text{Сj}}^1(\cdot);$$

$$C_{\text{СЦСС}}^1 = 3,86 \cdot W_{\text{ПЦСС}}^{0,412} \cdot M_{\text{ЦСС}}^{0,703} \text{ (} 0,6 \leq R \leq 2, 5 \leq M_{\text{ЦСС}} \leq 300 \text{ и } 0,01 \leq W_{\text{ПЦСС}} \leq 1 \text{)};$$

$$C_{\text{СССПИ}}^1 = 49,01 \cdot M_{\text{ССПИ}}^{0,234} \cdot W_{\text{ПССПИ}}^{0,761} \text{ (} 5 \leq M_{\text{ЦСС}} \leq 300 \text{ и } 0,01 \leq W_{\text{ПЦСС}} \leq 1 \text{)};$$

$$C_{\text{ССТР}}^1(\cdot) = 0,0122 \cdot M_{\text{СТР}}^{0,876} \cdot N_{\text{СТР}}^{0,734} \text{ (} 1,5 \leq M_{\text{СТР}} \leq 40 \text{ и } 15 \leq N_{\text{СТР}} \leq 250 \text{)}; C_{\text{СКон}}^1(\cdot) = 0,771 \cdot M_{\text{Кон}}^{0,754} \text{ (} 5 \leq M_{\text{Кон}} \leq 60 \text{)}.$$

В приведенных зависимостях размерность массы M - кг, энергопотребления $W_{\text{П}}$, мощности передающего устройства $P_{\text{ПРД}}$ и хладопроизводительности СТР $N_{\text{СТР}}$ - Вт, информационной производительности - км²/сеанс связи с НКПОР,

пространственного разрешения R - м, затрат средств C - млн.р., габаритных размеров L - м, объема $V - \text{м}^3$, плотности ρ - кг/м³.

Результаты решения задачи (2). Результаты расчета значений массы и затрат средств на изготовление 1-го базового образца подсистем МЦА с использованием моделей i -го уровня: ${}^{i-1}M_{\text{МЦА}} \approx 76,0$ кг и ${}^{i-1}C_{\text{МЦА}}^1 \approx 40,3$ млн.р.

Оценим разность численных значений затрат и массы МЦА:

$$\Delta C_{\text{МЦА}}^1 = \left| {}^{i-1}C_{\text{МЦА}}^1 - {}^i C_{\text{МЦА}}^1 \right| = 56,7 - 40,3 = 16,4 \text{ млн.р.},$$

$$\Delta M_{\text{МЦА}} = \left| {}^{i-1}M_{\text{МЦА}} - {}^i M_{\text{МЦА}} \right| = 92 - 76,0 = 16,0 \text{ кг}.$$

Анализ решения задач (1) и (2) показывает, что результаты оценки характеристик $C_{\text{МЦА}}^1$ и ${}^{i-1}M_{\text{МЦА}}$ модуля МЦА различны. Отличие в их значениях объясняется тем, что при решении задачи (2) использовались детальные проектные модели подсистем модуля МЦА.

Задача направленной адаптации проектной модели КА.

Адаптация проектной модели и уточнение функциональных связей КА на $i-1$ -м уровне управления разработкой осуществляется по данным исследований характеристик модуля МЦА на i -м уровне. За счет направленной адаптации и уточнения функциональных связей обеспечивается согласование проектных решений КА на $i-1$ -м уровне управления разработкой и проектных решений, принимаемых для модуля МЦА на i -м уровне.

В статье ограничимся рассмотрением постановки задачи направленной адаптации зависимостей для определения массы МЦА и затрат на изготовление 1-го

базового образца МЦА. Пусть на $i-1$ -м и i -м уровнях управления разработкой массы МЦА ${}^{i-1}M_{\text{МЦА}}(\cdot)$ и ${}^iM_{\text{МЦА}}(\cdot)$ определяются в виде ${}^{i-1}M_{\text{МЦА}} = {}^{i-1}M_{\text{МЦА}}({}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}, {}^{i-1}\beta(t_i))$ и ${}^iM_{\text{МЦА}} = {}^iM_{\text{МЦА}}({}^i\Pi_{\text{МЦА}}, {}^i\beta(t_i))$ при ${}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}} \in {}^{i-1}G_{\text{МЦА}}({}^{i-2}\Pi_{\text{МЦА}}, t_i)$ и ${}^i\Pi_{\text{МЦА}} \in {}^iG_{\text{МЦА}}({}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}, t_i)$.

Затраты на создание (изготовление) 1-го базового образца МЦА ${}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1(\cdot)$ и ${}^iC_{\text{СМЦА}}^1(\cdot)$ имеют вид ${}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1 = {}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1({}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}, {}^{i-1}\beta(t_i))$ и ${}^iC_{\text{СМЦА}}^1 = {}^iC_{\text{СМЦА}}^1({}^i\Pi_{\text{МЦА}}, {}^i\beta(t_i))$ при ${}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}} \in {}^{i-1}G_{\text{МЦА}}({}^{i-2}\Pi_{\text{МЦА}}, t_i)$ и ${}^i\Pi_{\text{МЦА}} \in {}^iG_{\text{МЦА}}({}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}, t_i)$.

Тогда задача направленной адаптации формулируется в следующем виде: для двухуровневого управления разработкой модуля МЦА провести оценку согласованности решений проектной задачи оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КА в составе КС ДЗЗ на $i-1$ -м уровне управления разработкой и решений проектной задачи оптимизации (оценки) характеристик модуля МЦА на i -м уровне управления разработкой с учетом особенностей ПКР подсистем модуля при выполнении условий

$$\left| {}^{i-1}M_{\text{МЦА}}({}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), {}^{i-1}\beta(t_i)) - {}^iM_{\text{МЦА}}({}^i\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), {}^i\beta(t_i)) \right| \leq \Delta M^* ;$$

$$\left| {}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1({}^{i-1}\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), {}^{i-1}\beta(t_i)) - {}^iC_{\text{СМЦА}}^1({}^i\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), {}^i\beta(t_i)) \right| \leq \Delta C^* ,$$

где ΔM^* и ΔC^* - наперед заданные малые величины, определяющие условия согласования решений проектных задач (1) и (2).

Решение задачи представляет собой итерационный процесс, в котором каждая итерация предполагает различные ПКР подсистем модуля МЦА при изменении относительного параметра R/H от номинального значения на величину $\pm \Delta(R/H)$.

Блок-схема алгоритма двухуровневого согласованного оптимизационного поиска характеристик МЦА и КА к моменту t_i приведена на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма двухуровневого согласованного оптимизационного поиска характеристик МЦА и КА к моменту t_i

Ниже исследуется влияние особенностей ПКР подсистем МЦА на технико-экономические характеристики КА, проводится оценка риска реализации космической системы при реализации в планируемый период. В качестве примера приведены результаты решения задачи (3) для первой итерации ($\Delta(R/H) = \pm 30\%$).

С использованием разработанного компьютерного программного обеспечения в среде Mathcad 14 в табл. 2 и 3 приведены результаты расчета характеристик как МЦА, так и его подсистем (ЦСС, ССПИ, СТР, конструкции). Номинальное значение R/H , полученное из проектно-баллистического расчета, составляет $3,565 \cdot 10^{-6}$.

Таблица 2

Результаты расчета надежности (ВБР), энергопотребления и затраты на изготовление 1-го базового образца подсистем модуля МЦА

Наименование характеристики	Наименование подсистемы	Масса МЦА		
		53,199	75,998	98,797

Надежность (ВБР)	ЦСС	0,9594	0,9700	0,9764
	ССПИ	0,9753	0,9807	0,9849
	СТР	0,9816	0,9922	0,9965
	Конструкция	0,9786	0,9924	0,9974
	МЦА в целом	0,8971	0,9367	0,9558
Энерго- потребление, Вт	ЦСС	84,862	95,421	107,761
	ССПИ	73,294	80,316	87,103
	СТР	18,454	19,265	20,069
	МЦА в целом	176,610	195,002	214,933
	Хладопроизводительность СТР, Вт	34,969	38,610	42,557
Затраты на изготовление 1-го базового образца, млн. р.	ЦСС	13,209	19,275	25,376
	ССПИ	12,083	13,540	14,945
	СТР	0,319	0,445	0,579
	Конструкция	3,485	4,434	5,293
	Прочие элементы	2,011	2,631	3,208
	МЦА в целом	31,107	40,325	49,401

Таблица 3

Результаты расчета массы подсистем модуля МЦА

Наименование подсистемы или коэффициента	Относительная величина R/H		
	$2,9655 \times 10^{-6}$	$3,5650 \times 10^{-6}$	$4,7680 \times 10^{-6}$
	Масса, кг		
ЦСС	58,279	42,956	27,769
ССПИ	17,498	14,937	12,363
СТР	3,526	2,833	2,104
Конструкция	12,870	10,177	7,395
Прочие элементы	6,624	5,095	3,568
МЦА в целом	98,797	75,998	53,199

Для первой итерации модель затрат средств на создание 1-го базового образца МЦА на $i-1$ -м уровне управления разработкой имеет вид: $C_{\text{МЦА}}^1 = 1,6009 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,7461}$.

Аналогичные расчеты проведены при изменении относительного параметра R/H от номинального значения на величину $\pm 20\%$ (2-я итерация), $\pm 10\%$ (3-я итерация) и $\pm 5\%$ (4-я итерация). Результаты расчетов сведены в табл. 4.

**Результаты направленной адаптации модели затрат на создание 1-го
базового образца МЦА на $i-1$ -м уровне управления разработкой**

Номер итерации	Результаты адаптации модели ${}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1(\cdot)$ (регрессионная модель верхнего уровня)	Диапазон изменения ${}^{i-1}M_{\text{МЦА}}$, кг	${}^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1$, млн.р.
0	$C_{\text{СМЦА}}^1 = 3,528 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,614}$	50 - 350	56,7
1	$C_{\text{СМЦА}}^1 = 1,6009 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,7461}$	53,2 - 98,8	40,511
2	$C_{\text{СМЦА}}^1 = 1,5805 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,7485}$	60,8 - 91,2	40,409
3	$C_{\text{СМЦА}}^1 = 1,5676 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,75}$	63,4 - 83,6	40,346
4	$C_{\text{СМЦА}}^1 = 1,5644 \cdot M_{\text{МЦА}}^{0,7504}$	72,2 - 79,8	40,330

Результаты расчета точности оценки массы МЦА $\Delta^{i-1}M_{\text{МЦА}}$ и затрат средств на изготовление 1-го базового образца МЦА $\Delta^{i-1}C_{\text{СМЦА}}^1$ от номера итерации при согласовании решений задач верхнего ($i-1$) и нижнего (i) уровней управления разработкой приведены на рис. 6. Из рис. 6 следует, что за счет направленной адаптации проектной модели и уточнения функциональных связей обеспечивается требуемая точность решения задачи оценки технико-экономических характеристик модификаций КА в составе КС ДЗЗ. Так, например, при значениях $\Delta M^{\text{зд}}=0,3$ кг и $\Delta C^{\text{зд}}=0,1$ млн.р. точность решения по массе достигается при 3-й итерации, а по затратам средств – при 2-й итерации.

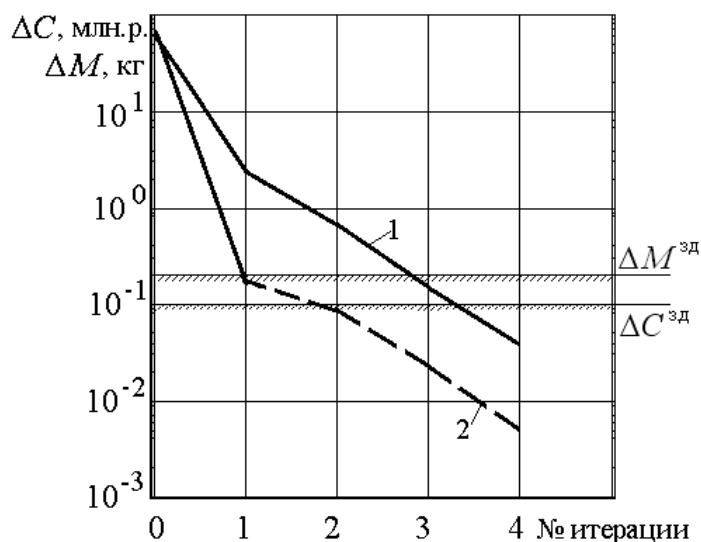


Рис. 6. Зависимость $\Delta^{i-1}M_{\text{мца}}$ (1) и $\Delta^{i-1}C_{\text{смца}}^1$ (2) от номера итерации ($\Delta M^{\text{зд}}$ и $\Delta C^{\text{зд}}$ - заданные значения по точности определения массы и затрат средств)

Результаты исследования

При проведении исследований ограничимся рассмотрением зависимости $C_{\text{смца}}^1 = C1 \cdot M_{\text{мца}}^\alpha$ и оценкой разброса статистических коэффициентов $C1$ и α . Статистические данные (модельные значения) по основным характеристикам прототипов КА ДЗЗ с оптико-электронной целевой съемочной системой видимого и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн представлены выше (табл. 1). Значения математического ожидания и $MC1$ $M\alpha$ и среднего квадратичного отклонения $\sigma C1$ и $\sigma\alpha$ случайных коэффициентов для исходной зависимости (нулевой итерации) и первых трех итераций приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения математического ожидания и среднего квадратичного отклонения случайных коэффициентов

Обозначение коэффициентов	Диапазон изменения $i^{-1}M_{\text{МЦА}}, \text{ кг}$	Значения коэффициентов	
		Математическое ожидание	Среднее квадратичное отклонение
C1	50 - 350	3,528	2,1091
	53,2 - 98,8	1,6009	$7,23 \times 10^{-3}$
	60,8 - 91,2	1,5805	$3,25 \times 10^{-3}$
	63,4 - 83,6	1,5676	$5,09 \times 10^{-4}$
α	50 - 350	0,614	0,2687
	53,2 - 98,8	0,7461	$1,28 \times 10^{-2}$
	60,8 - 91,2	0,7485	$8,88 \times 10^{-3}$
	63,4 - 83,6	0,75	$1,93 \times 10^{-4}$

На модельной задаче проведена оценка риска реализации проекта КС ДЗЗ в планируемый период. Предполагается, что известна программа реализации проекта КС ДЗЗ (количество КА в системе - 4, сроки разработки и создания (изготовления) КА – 2,5 года, планируемый период реализации системы $\langle T \rangle = 20$ и 25 лет). Зависимости $M_{\beta} C_{\Sigma_{\text{КС}}}(\cdot)$ и $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{\text{КС}}}(\cdot)$ от $T_{\text{САС}}$ КА при $\langle T \rangle = 25$ лет и $\langle T \rangle = 20$ лет для нулевой и первых трех итераций приведены на рис. 7 - 15.

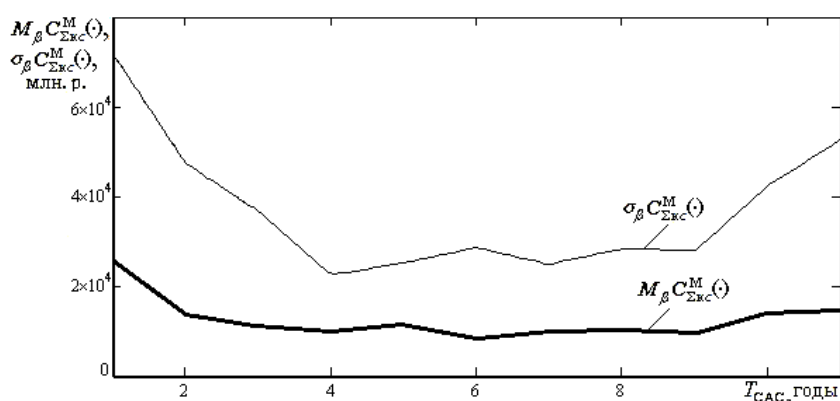


Рис. 7. Зависимости $M_{\beta} C_{\Sigma_{\text{КС}}}(\cdot)$ и $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{\text{КС}}}(\cdot)$ от $T_{\text{САС}}$ КА при $\langle T \rangle = 25$ лет

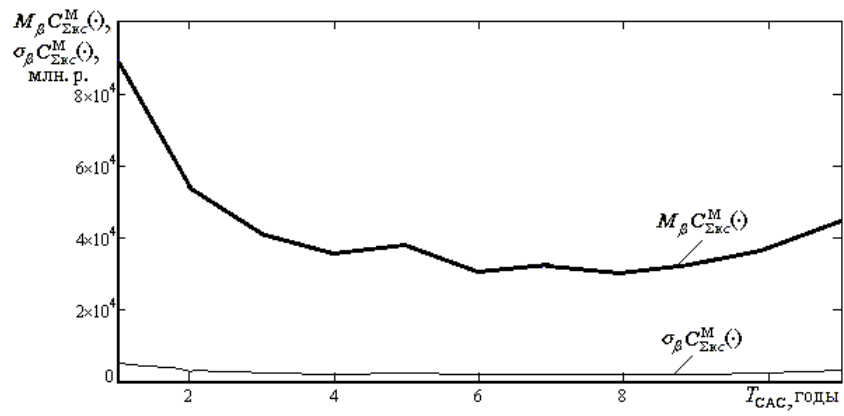


Рис. 8. Зависимости $M_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}(\cdot)$ и $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}(\cdot)$ от T_{CAS} КА при $\langle T \rangle = 25$ лет (1-я итерация)

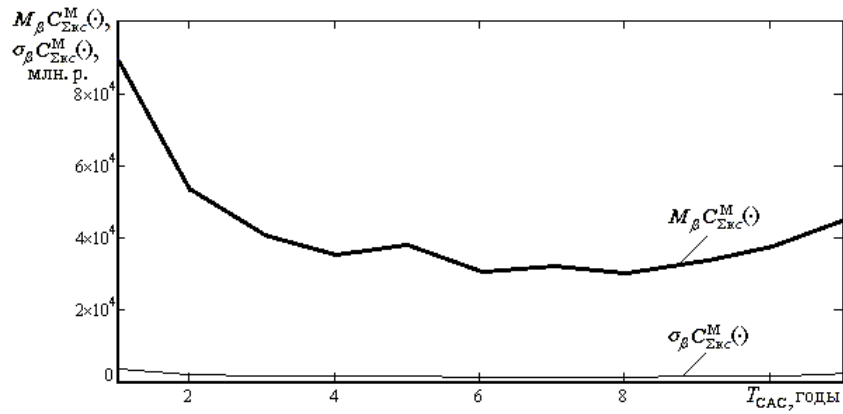


Рис. 9. Зависимости $M_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}(\cdot)$ и $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}(\cdot)$ от T_{CAS} КА при $\langle T \rangle = 25$ лет (2-я итерация)

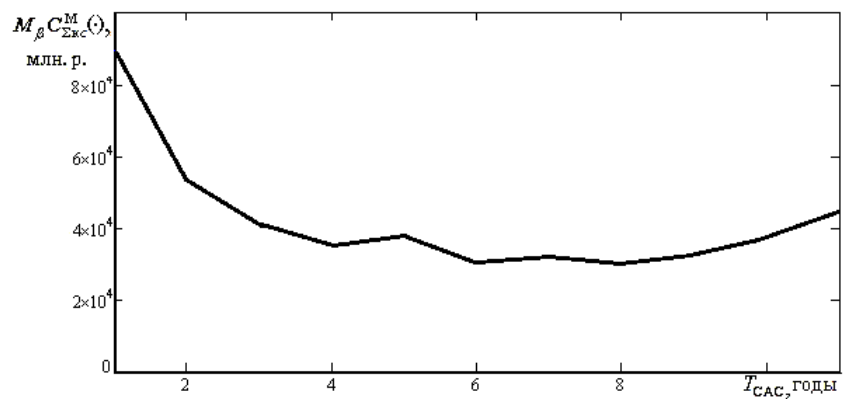


Рис. 10. Зависимость $M_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}(\cdot)$ от T_{CAS} КА при $\langle T \rangle = 25$ лет (3-я итерация)

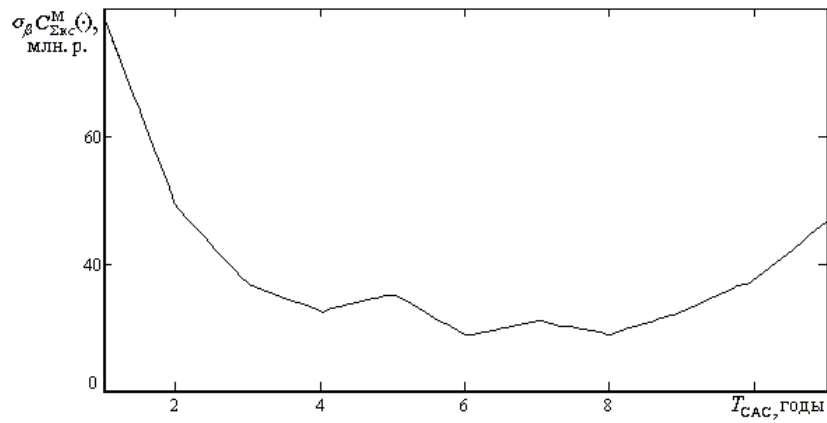


Рис. 11. Зависимость $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot)$ от T_{CASC} КА при $\langle T \rangle = 25$ лет ((3-я итерация))

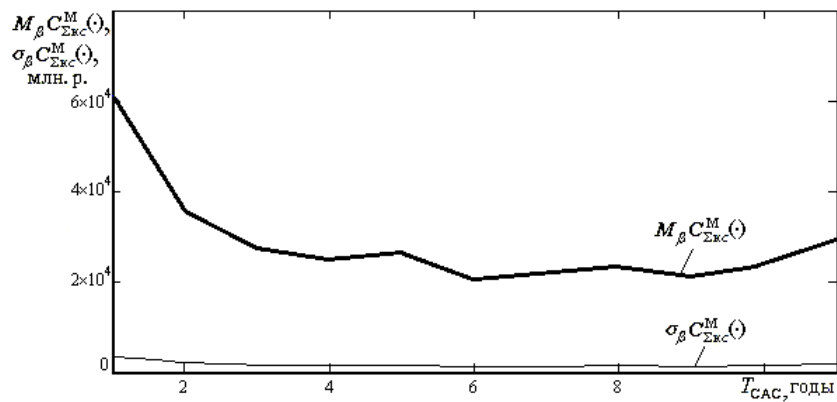


Рис. 12. Зависимости $M_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot)$ и $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot)$ от T_{CASC} КА при $\langle T \rangle = 20$ лет (1-я итерация)

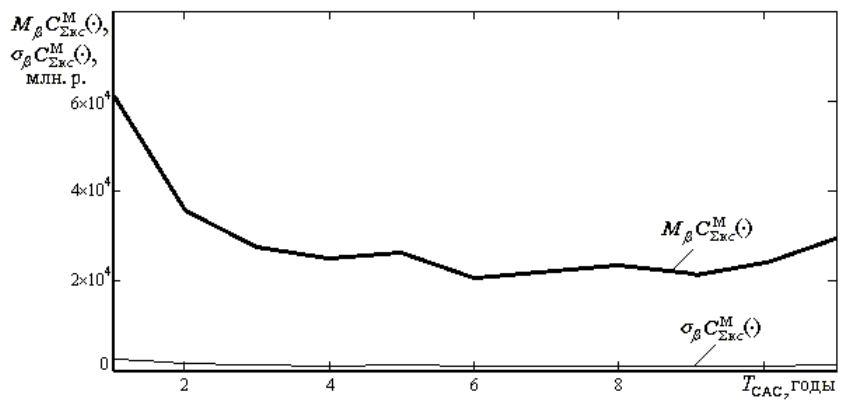


Рис. 13. Зависимости $M_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot)$ и $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot)$ от T_{CASC} КА (2-я итерация)

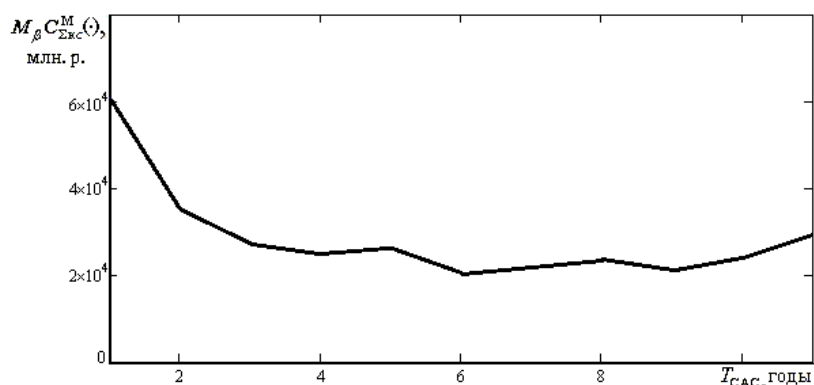


Рис. 14. Зависимость $M_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M (\cdot)$ от T_{CASC} КА при $\langle T \rangle = 20$ лет (3-я итерация)

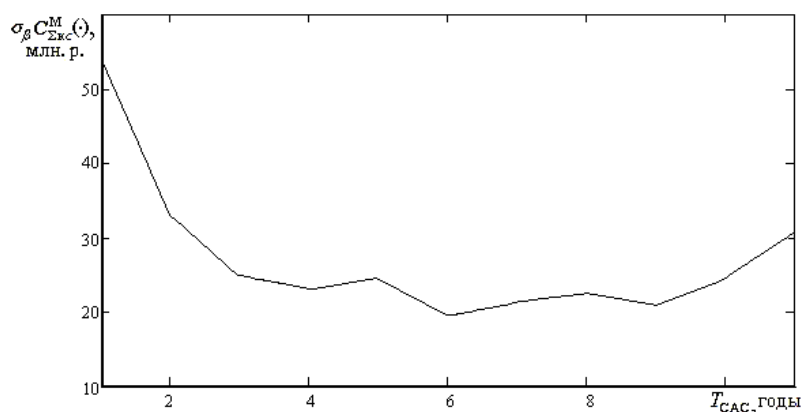


Рис. 15 . Зависимость $\sigma_{\beta} C_{\Sigma_{KC}}^M (\cdot)$ от T_{CASC} КА при $\langle T \rangle = 20$ лет (3-я итерация)

Как видно из рис. 7 - 15 уточнение проектного решения (повышение точности решения проектных задач (1) и (2)) существенно снижает потери (риск) затрат средств на реализацию проекта КС ДЗЗ в планируемый период. Например, повышение точности определения массы модуля МЦА вдвое (итерации 1 и 2) снижает риск реализации проекта системы в планируемый период $\langle T \rangle = 25$ лет на 30%. Уменьшение планируемого периода с 25 до 20 лет при равных значениях точности определения массы модуля МЦА снижает затраты средств в полтора раза, а риск реализации почти на 35%.

Выводы

Приведена постановка задачи оптимизации (оценки) параметров КА в составе КС ДЗЗ при модернизации к моменту времени t_i учетом особенностей ПКР заменяемых подсистем при наличии случайных факторов. Для решения задачи применяется двухуровневая модель управления разработкой и метод двухуровневой согласованной оптимизации.

Даны постановки проектных задач верхнего и нижнего управления разработкой, двухуровневой согласованной оптимизации (оценки) параметров КА, разработаны алгоритмы их решения. Алгоритм проведения исследований включает последовательно решение проектных задачи на верхнем и нижнем уровне управления разработкой, при этом реализуется процедура согласования проектных решений. Такой подход с одной стороны дает возможность учесть особенности проектно-конструкторских решений подсистем КА без расширения состава проектной модели, с другой стороны - оценка параметров подсистем аппарата на нижнем уровне управления (при детализации проектной модели) проводится с учетом динамики функциональных ограничений (массовых, габаритных, информационных и энергетических). Детализация такого подхода дает возможность организовать многовариантные исследования (при ограничении на сроки работ) и обеспечивает определение рационального проектного решения задачи.

Исследованы вопросы согласования решений проектных задач в случае двухуровневого оптимизационного поиска. Показано, что за счет направленной адаптации (уточнении коэффициентов моделей) проектной модели КА и уточнения функциональных связей при оценке характеристик подсистем точность решения

задачи оценки параметров возрастает. Применение методики при соответствующей настройке проектных моделей позволяет исследовать влияние особенностей ПКР подсистем КА на эффективность системы, определить требования к точности коэффициентов проектной модели и провести эффективное уточнение проектного решения с целью снижения риска реализации проекта КС ДЗЗ.

Библиографический список

1. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Методика прогнозных исследований перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли//Общероссийский научно-технический журнал «Полет». № 9. 2010. С. 18 - 26.
2. Ламзин В.В., Матвеев Ю.А. Двухуровневая модель принятия проектных решений при разработке космической системы ДЗЗ и факторы неопределенности// Общероссийский научно-технический журнал «Полет». № 1. 2012. С. 40 - 45.
3. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Исследование характеристик космической системы дистанционного зондирования Земли при неопределённости технико-экономических моделей//Общероссийский научно-технический журнал «Полет». № 8. 2010. С. 9 - 17.
4. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Оптимизация параметров космической системы дистанционного зондирования Земли с учетом особенностей проектно-конструкторских решений космических аппаратов//Вестник Московского авиационного института, 2009. Т.16. №6. С. 55 - 66.
5. Четыркин Б.М. Статистические методы прогнозирования. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Статистика, 1975, 200 с.