

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИКАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПРОГНОЗИРУЕМЫЙ ПЕРИОД С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ

В. А. Ламзин, В. В. Ламзин

Предложена методика, позволяющая в прогнозируемый период провести сравнительную оценку характеристик модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Учитывается изменение целевой нагрузки и динамика функциональных связей. В основу разработанной методики положены представления о многоуровневом управлении разработкой и реализацией многоуровневой проектной модели. Приведены в детерминированной постановке проектные задачи оценки (оптимизации) параметров модификации космического аппарата и модуля целевой аппаратуры, а также задача направленной адаптации проектных зависимостей. Разработаны алгоритмы решения проектных задач, при этом реализуется процедура согласования проектных решений. Такой подход, с одной стороны, дает возможность учесть особенности проектных решений заменяемых подсистем космического аппарата без расширения состава проектной модели. С другой стороны, оценка (оптимизация) параметров подсистем аппарата при детализации проектной модели проводится с учетом динамики функциональных связей. Реализация такого подхода дает возможность организовать многовариантные исследования и обеспечивает определение рационального проектного решения за счет расширения области возможных решений. Полученные на модельном примере оценки характеристик модификаций аппаратов могут быть использованы для детального анализа эффективности перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли с целью прогнозирования их развития и расширения области применения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космическая система, космический аппарат, модернизация, модификация, прогнозирование, заменяемые подсистемы, проектная модель, параметры.

Введение

Концепция развития российской космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на период до 2025 г. и далее предусматривает наряду с развитием перспективных средств ДЗЗ поддержание созданных группировок КС, эффективную модернизацию их комплексов и создание модификаций КА. Модернизация комплексов, создание и введение в строй модификаций космических аппаратов (КА) ДЗЗ дает возможность при ограниченных затратах продлить срок эффективного применения техники, рационально использовать созданную техническую и технологическую базу, вести отработку ключевых технологий в обеспечение новых проектов.

В АО «Корпорация «ВНИИЭМ» реализован ряд проектов создания КА ДЗЗ различного назначения [1 – 11], рассматриваются вопросы улучшения характеристик, повышения эффективности перспективной техники. При создании модификаций КА реализуются принципы унификации базовых элементов, эффективное совершенствование модуля целевой аппаратуры (МЦА) и др. Принимаемые конкретные проектные решения обусловлены обычно целым рядом условий и ограничений технического, технологического и экономического характера. Анализ перспектив развития КС ДЗЗ на ближайшее десятилетие показывает, что с целью повышения их эффективности при ограниченных затратах широкое применение найдут модификации существующих аппаратов, созданные с учетом критических технологий,

эффективных проектно-конструкторских решений (ПКР), замены подсистем и др.

Особый интерес представляют проектные исследования, связанные с решением вопросов формирования рациональной программы модернизации КС ДЗЗ, включая определение типов и сроков создания модификаций КА, оценкой основных технико-экономических характеристик КА и системы в целом. Следует отметить, что прогнозные исследования направлений совершенствования КА и КС с учетом динамики функциональных связей и ограничений позволяют повысить эффективность разработки перспективных КА, обоснованно определить рациональные ПКР, сформировать программы совершенствования КС. Создание методических основ прогнозных исследований, сравнительной оценки характеристик модификаций КА в прогнозируемый период с учетом динамики функциональных связей представляют научный и практический интерес. Прогнозные исследования при формировании перспективных программ развития КС ДЗЗ позволяют также организовать работу по совершенствованию организации исполнителей и кооперации, оптимизации состава и структуры участников работ. Создание методических основ прогнозных исследований является важной задачей, поскольку такие исследования проводятся на начальном этапе проектных работ, а полученные данные используются для обоснования технического задания на новые разработки.

Изложенная в статье методика предназначена для сравнительной оценки характеристик модификаций КА в прогнозируемый период с учетом изменения целевой нагрузки и динамики функциональных связей. При оценке характеристик модификаций КА в прогнозируемый период используются двухуровневая модель проектных исследований, метод двухуровневой согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей, динамические статистические модели.

Ниже представлены проектные задачи оценки (оптимизации) параметров модификации КА и МЦА, а также задача направленной адаптации проектных зависимостей.

Постановка задач оценки (оптимизации) характеристик модификации космических аппаратов

Структура КС ДЗЗ (структура технических средств, используемых для решения задачи) приведена на рис. 1.

КС ДЗЗ состоит из двух сегментов: космического и наземного. Предполагается, что реализуется модульный принцип создания КА. КА, входящий в космический сегмент системы, рассматривается как объект, включающий два модуля: МЦА и служебных подсистем (МСП). МЦА рассматривается как объект, включающий целевую съемочную систему (ЦСС), систему сбора и передачи информации (ССПИ), систему терморегулирования (СТР) и конструкцию (КОН).

Рассмотрим задачу оценки (оптимизации) параметров модификации КА и замены подсистем в МЦА. При решении задачи используется двухуровневая модель управления разработкой КА и метод двухуровневой согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей [12]. На верхнем уровне управления разработкой проводится проектный анализ КА как объекта в целом. На нижнем уровне – детальный проектный анализ МЦА с учетом особенностей проектных решений заменяемых подсистем модуля. При этом последовательно решаются следующие задачи:

- оптимизация параметров модификаций КА в составе КС ДЗЗ к моменту времени t_i (верхний уровень управления разработкой);
- оптимизация параметров МЦА при заданных функциональных и параметрических связях (нижний уровень управления разработкой);
- направленная адаптация проектной модели модификации КА, уточнение функциональных и параметрических связей, реализация согласованной оптимизации модификации КА и МЦА.

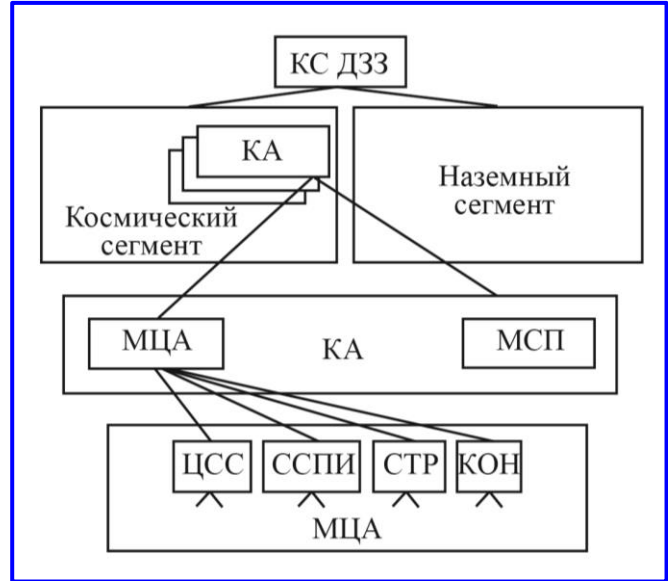


Рис. 1. Структура космической системы дистанционного зондирования Земли

Рассмотрим указанные задачи подробнее.

Постановка задачи 1. При заданных параметрах наземного сегмента, целевой нагрузке и параметрах орбиты определить параметры модификации КА ДЗЗ, при которых целевая эффективность, надежность и информационная производительность аппарата были бы не меньше, а массогабаритные характеристики не больше заданных, при этом суммарные затраты на реализацию проекта создания модификации КА к моменту времени t_i были бы минимальными.

Формально математическая постановка задачи 1 представляется в виде:

$$C_{\Sigma КА} (M_{МЦА} (\Pi_{МЦА} (\cdot), \beta_{МЦА} (t_i)); M_{МСП} (\Pi_{МСП} (\cdot), \beta_{МСП} (t_i)) \rightarrow \min_{\Pi_{КА} \in G_{КА}(t_i), \Pi_{КА}(\cdot)} ; (1)$$

при выполнении ограничений:

$$\begin{aligned} \Pi_{НС}(t_i) &= \Pi_{НС}(t_i)^T; \quad \Psi(t_i) = \Psi(t_i)^T; \quad H_{КА} = H_{КА}^T; \\ i_{КА} &= i_{КА}^T; \quad I_{ПРКА} (\Pi_{КА} (\cdot), \Pi_{НС} (\cdot), \Psi(t_i)) \geq I_{ПРКА}^T; \\ W_{КА} (I_{ПРКА} (\cdot), \dots) &\geq W_{КА}^T; \quad M_{КА} (\Pi_{КА} (\cdot)) \leq M_{КА}^T; \\ P_{КА} (M_{КА} (\cdot)) &\geq P_{КА}^T; \quad \Gamma_{КА} (\cdot) = \Gamma_{КА}^T; \quad t_i \in \langle T \rangle, \end{aligned}$$

где $C_{\Sigma КА}(\cdot)$ – суммарные затраты на реализацию проекта создания модификации КА к моменту времени t_i ; $C_{МЦА}(\cdot)$ – затраты на реализацию проекта создания МЦА; $C_{МСП}(\cdot)$ – затраты на создание МСП; $\Pi_{МЦА}(\cdot)$ и $\Pi_{МСП}(\cdot)$ – векторы параметров МЦА и МСП; $\beta_{МЦА}(t_i)$ – вектор определяющих параметров к моменту времени t_i ; $G_{КА}(\cdot)$ – область допустимых решений, определяемая функциональными связями (внешними и внутренними); $\Pi_{НС}(t_i)$ –

параметры наземного сегмента КС ДЗЗ к моменту времени t_i ; $\Psi(t_i)$ – требования к целевой нагрузке модификации КА к моменту времени t_i ; $H_{КА}$ и $i_{КА}$ – высота и наклонение орбиты функционирования модификации КА; $I_{КА}(\cdot)$ – функция, определяющая информационную производительность модификации КА; $W_{КА}(\cdot)$ – целевая эффективность модификации КА (определяется рядом показателей, например периодичностью наблюдения, количеством спектральных каналов и др.); $M_{КА}(\cdot)$ и $\Gamma_{КА}(\cdot)$ – соответственно функции, определяющие массу и габаритные размеры модификации КА; $P_{КА}(\cdot)$ – функция, определяющая надежность модификации КА; $\langle T \rangle$ – прогнозируемый период существования КС ДЗЗ; индекс «т» – требуемые (заданные) значения параметров или функций.

Таким образом, задача проектирования модификации КА ДЗЗ в общем случае сводится к определению таких значений параметров аппарата, при которых обеспечивается выполнение целевой задачи в течение прогнозируемого периода времени $W_{КА}(\cdot) \geq W_{КА}^T$, $P_{КА}(\cdot) \geq P_{КА}^T$, $M_{КА}(\cdot) \leq M_{КА}^T$ и затраты средств на разработку и создание модификации КА минимальны.

Особенности задачи 1

Задача 1 является многокритериальной. При записи многокритериальной задачи используется метод ограничений. Критерием – основным показателем эффективности принимаемого проектного решения – являются затраты на создание модификации КА. На другие показатели эффективности, такие как $M_{КА}$, $W_{КА}$ и $P_{КА}$, наложены ограничения типа неравенств. Такой подход дает возможность учесть влияние новых требований $M_{КА}^T$, $W_{КА}^T$, $P_{КА}^T$ на выбор проектных решений модификации КА. Выбираемые параметры – $\Pi_{МЦА}$, $\Pi_{МСП}$, $M_{МЦА}$ и $M_{МСП}$. Так как при решении задачи используются опытные данные, статистика по образцам-прототипам, то определяющие параметры – статистические коэффициенты – являются случайными величинами. Следовательно, задачу 1 надо рассматривать как стохастическую проектную задачу. При решении такой задачи в чистых стратегиях выбирают проектные параметры из допустимой области таким образом, чтобы математическое ожидание затрат на разработку и создание модификации КА ДЗЗ было минимально. При формировании алгоритма и проектной модели задача 1 рассматривается в детерминированной постановке, как указано выше. На рис. 2 приведена укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров модификации КА к моменту времени t_i .

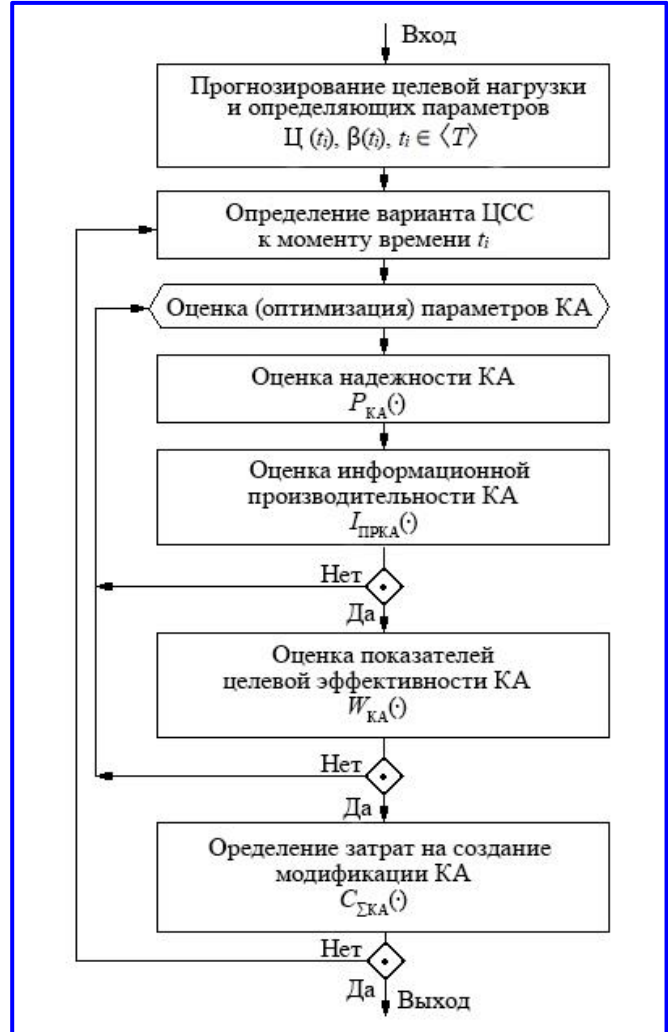


Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров модификации космического аппарата к моменту времени t_i

Основные соотношения проектной модели

Проектная модель, которая используется при решении задачи 1, включает соотношения для определения затрат на создание (разработку, изготовление, испытания и выведение на орбиту функционирования) модификации КА, а также зависимости для определения массы, информационной производительности, надежности и функциональной эффективности. Следует отметить, что при значительной длительности прогнозируемого периода $\langle T \rangle$ модернизации системы, в рамках которого осуществляется реализации проекта создания модификаций КА, необходимо учитывать влияние динамики внешних факторов и темпы научно-технического прогресса на определение массы и затрат, то есть на изменение функциональных связей.

В данном случае при прогнозировании технико-экономических характеристик перспективных мо-

дификаций КА воспользуемся методом формирования динамических статистических моделей вида:

$$y = y(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}(t_i)),$$

где y – определяющий показатель; \mathbf{x} – вектор факторов статистической зависимости; $\boldsymbol{\beta}(t_i)$ – вектор-функция изменения коэффициентов в зависимости от времени реализации проекта t_i (так называемые динамические параметры модели).

Например, для заданного типа и состава ЦСС масса $M_{ЦСС}$ к моменту времени t_i представляется функцией величин R/H и $\boldsymbol{\beta}(t_i)$:

$$M_{ЦСС} = f(R/H, \boldsymbol{\beta}(t_i)),$$

где H и R – соответственно высота орбиты КА и пространственное разрешение.

Приведенная зависимость $M_{ЦСС} = f(R/H, \boldsymbol{\beta}(t_i))$ формируется по данным статистической выборки, определенной на некотором временном интервале ΔT . Следует отметить, что на значения динамических параметров модели $\boldsymbol{\beta}(t_i)$ влияют особенности реализуемых изделий, развитие опытного производства. Рассматривая динамику коэффициентов за несколько лет предыстории на основе данных образцов-прототипов и проводя экстраполяцию, можно определить их значение к моменту t_i , но для реализации необходимы большой объем статистики и значительная предыстория. На практике, однако, такие условия редко выполняются. В статье при наличии относительно небольшого объема статистических данных используется метод, предложенный в [12].

1. *Соотношения для определения затрат на создание модификации КА.* Проведенный предварительный анализ позволил определить опытные данные по известным прототипам КА ДЗЗ [13 – 25]. На основе этих данных сформирована динамическая статистическая модель определения затрат на реализацию проекта модификации КА $C_{\Sigma КА}(\cdot)$ в зависимости от массы аппарата $M_{КА}$ и времени реализации t_i :

$$C_{\Sigma КА}(\cdot) = f_1(M_{КА}, t_i) = a_1(t_i) + a_2(t_i)(M_{КА} - \bar{M}_{КА});$$

$$a_1(t_i) = a_1^1 + a_1^2 t_i; \quad a_2(t_i) = a_2^1 + a_2^2 t_i,$$

где $M_{КА}$ – масса КА; $\bar{M}_{КА}$ – среднее значение массы КА; $a_1(t_i)$ и $a_2(t_i)$ – функции, определяющие значения коэффициентов модели от времени создания модификации КА; a_1^1 , a_1^2 , a_2^1 и a_2^2 – статистические коэффициенты; t_i – момент времени, к которому проводится оценка выделенных показателей.

2. *Зависимости для определения массы модификации КА представляются в виде:*

$$M_{КА} = M_{МЦА} + M_{МСП}; \quad M_{МЦА} = k_{МЦА}(\cdot)M_{ЦСС};$$

$$M_{ЦСС} = \bar{M}_{ЦСС} \left(\frac{k_0}{R/H} \right)^{\alpha_{ЦСС}};$$

$$M_{МСП} = \bar{M}_{МСП} (R/H)^{\alpha_{МСП}},$$

где $M_{МЦА}$, $M_{МСП}$ – масса подсистем КА (МЦА и МСП); $k_{МЦА}(\cdot)$ – функция, определяющая отношение масс МЦА и ЦСС; $M_{ЦСС}$ – масса ЦСС; H и R – соответственно высота орбиты КА и пространственное разрешение ЦСС; $\bar{M}_{ЦСС}$, $\bar{M}_{МСП}$, k_0 , $\alpha_{ЦСС}$ и $\alpha_{МСП}$ – статистические коэффициенты.

3. *Соотношения для оценки надежности модификации КА.* В статье для оценки надежности модификации КА рассматривается показатель надежности – вероятность безотказной работы (ВБР) в течение срока активного существования (САС). Для выбранных значений масс подсистем КА ($M_{МЦА}$ и $M_{МСП}$) проводится оценка значений надежности $P_{МЦА}$, $P_{МСП}$ и $P_{КА}$, определяемых по методике, приведенной в [12].

ВБР КА определяется в виде:

$$P_{КА} = P_{МЦА}P_{МСП}.$$

Зависимости для определения ВБР МЦА и МСП имеют вид:

$$P_{МЦА} = 1 - \bar{p}_{МЦА} e^{-\alpha_1 M_{МЦА}};$$

$$P_{МСП} = 1 - \bar{p}_{МСП} e^{-\alpha_2 M_{МСП}},$$

где $\bar{p}_{МЦА}$, $\bar{p}_{МСП}$, α_1 , α_2 – статистические коэффициенты.

Из опыта разработки КА известно использование линейной зависимости $P = \bar{p} + \bar{p}M$, что может быть справедливо при небольшом изменении $M_{МЦА}$ и $M_{МСП}$. Тогда

$$P_{МЦА} = \bar{p}_{МЦА} + \bar{p}_{МЦА} M_{МЦА};$$

$$P_{МСП} = \bar{p}_{МСП} + \bar{p}_{МСП} M_{МСП},$$

где $\bar{p}_{МЦА}$, $\bar{p}_{МСП}$ и $\bar{p}_{МСП}$ – статистические коэффициенты.

4. *Информационная производительность является одной из важных характеристик выполнения КА своих целевых задач.* Существуют различные понятия термина информационная производительность. В статье информационная производительность КА ДЗЗ оценивается площадью изображения земной поверхности, полученной ЦСС за один се-

анс передачи информации с борта КА на наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР). Для оценки информационной производительности используется соотношение:

$$I_{\text{ПРКА}} = \bar{I} M_{\text{МЦА}}^{\alpha_1} (R/H)^{\alpha_2},$$

где \bar{I} , α_1 и α_2 – статистические коэффициенты, которые определяются по методике, приведенной в [12]; размерность \bar{I} в м²/кг, R/H , α_1 и α_2 – безразмерные величины.

5. *Целевая эффективность модификации КА определяется рядом показателей.* В статье рассматриваются следующие показатели: количество спектрозональных каналов $N_{\text{зон}}$, пространственное разрешение спектрозонального канала R , ширина полосы захвата ЦСС ΔL , количество каналов передачи целевой информации $N_{\text{к}}$, пропускная способность радиоканала передачи целевой информации, объем информации (информационная производительность) $I_{\text{ПРКА}}$, получаемый за время существования аппарата.

Постановка задачи 2. В случае двухуровневой согласованной оптимизации параметров модификации КА при замене подсистем на нижнем уровне управления разработкой рассматривается задача оптимизации параметров подсистемы КА. Разберем случай, когда при создании модификации КА проводится замена только МЦА. Полагается, что параметры наземного сегмента заданы, МСП заменяется унифицированной космической платформой (УКП). При заданном типе ЦСС, входящей в состав МЦА, и значениях ее обобщенных характеристик определить параметры модуля такие, при которых затраты на реализацию проекта создания модуля на нижнем уровне управления разработкой при выполнении ограничений были бы минимальными.

Формально математическая постановка задачи 2 представляется в виде

$${}^*C_{\text{МЦА}}({}^*\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), {}^*\beta(t_i)) \rightarrow \min_{{}^*\Pi_{\text{МЦА}} \in {}^*G_{\text{МЦА}}(t_i)}; \quad (2)$$

при выполнении функциональных и параметрических ограничений:

$$\begin{aligned} H_{\text{КА}} &= H_{\text{КА}}^T; i_{\text{КА}} = i_{\text{КА}}^T; \Delta\lambda = \Delta\lambda^T; N_{\text{зон}} = N_{\text{зон}}^T; R = R^T; \\ \Delta L &= \Delta L^T; I_{\text{ПРМЦА}}(\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot), \dots) \geq I_{\text{ПРМЦА}}^T; \\ M_{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot)) &\leq M_{\text{МЦА}}^T; P_{\text{МЦА}}(M_{\text{МЦА}}) \geq P_{\text{МЦА}}^T, \end{aligned}$$

где ${}^*C_{\text{МЦА}}(\cdot)$ – затраты на реализацию проекта создания МЦА на нижнем уровне управления разра-

боткой; ${}^*\Pi_{\text{МЦА}}(\cdot)$ – функция, определяющая состав и параметры МЦА на нижнем уровне управления разработкой; ${}^*G_{\text{МЦА}}(\cdot)$ – область допустимых решений МЦА, определяемая функциональными связями (внешними и внутренними); $H_{\text{КА}}$ и $i_{\text{КА}}$ – высота и наклонение орбиты модификации КА ДЗЗ; $\Delta\lambda$, $N_{\text{зон}}$, R и ΔL – соответственно спектральный диапазон, количество спектральных зон, пространственное разрешение (проекция элемента в надири) и полоса захвата ЦСС МЦА; $I_{\text{ПРМЦА}}(\cdot)$ – функция, определяющая информационную производительность МЦА на нижнем уровне управления разработкой; $P_{\text{МЦА}}(\cdot)$ и $M_{\text{МЦА}}(\cdot)$ – функции, определяющие надежность и массу МЦА на нижнем уровне управления разработкой; остальные обозначения соответствуют обозначениям, приведенным выше.

Особенности задачи

Функциональные связи $M_{\text{МЦА}}^T$, $P_{\text{МЦА}}^T$ и $W_{\text{МЦА}}^T$ определяются на верхнем уровне управления разработкой. Задача 2 является многокритериальной. При записи многокритериальной задачи используется метод ограничений. Критерием – основным показателем эффективности принимаемого проектного решения – являются затраты на создание модификации МЦА. На другие показатели эффективности ($M_{\text{МЦА}}(\cdot)$, $P_{\text{МЦА}}(\cdot)$, $W_{\text{МЦА}}(\cdot)$) наложены ограничения типа неравенств. Такой подход дает возможность учесть влияние новых требований $M_{\text{МЦА}}^T$, $P_{\text{МЦА}}^T$ и $W_{\text{МЦА}}^T$ на выбор проектных решений модификации МЦА в составе КА. В случае создания модификации МЦА проводится замена подсистем новыми, с тем чтобы повысить эффективность модуля и КА в целом. При проектных исследованиях проводится уточнение проектной модели МЦА, поиск оптимальных параметров модификации МЦА: $\Pi_{\text{ЦСС}}$ и $M_{\text{ЦСС}}$. Таким образом, задача проектирования модификации МЦА является многопараметрической. Так как при решении задачи 2, так же как и при решении задачи 1, используются опытные данные (статистика по образцам-прототипам), то вектор статистических коэффициентов проектной модели $\beta(t_i)$: являются случайной величиной. Тогда задачу 2 следует рассматривать как стохастическую проектную задачу. В статье задача 2 разбирается в детерминированной постановке.

Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров подсистемы КА (МЦА) при заданных функциональных и параметрических связях (нижний уровень управления разработкой) приведена на рис. 3.

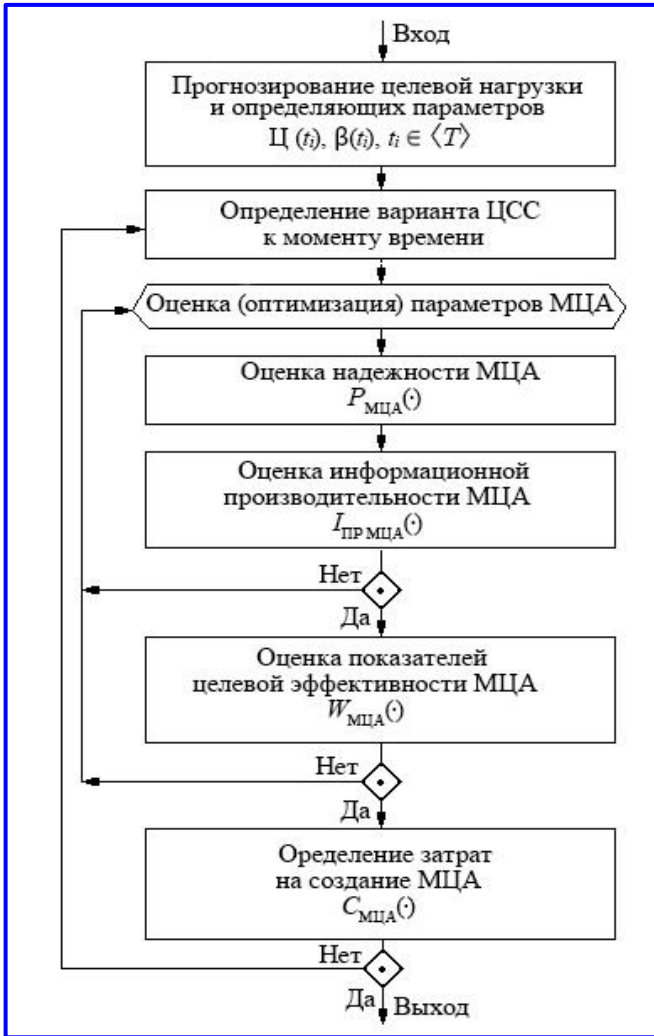


Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма решения задачи 2

Так как характеристики модуля УКП заданы, то формирование проектных моделей оценки массы, надежности, информационной производительности, показателей целевой эффективности и затрат на нижнем уровне управления разработкой проводится подробно только для МЦА.

Основные соотношения проектной модели

Для решения задачи 2 формируется структура проектной модели в соответствии с разработанным алгоритмом. Она включает четыре основных блока, содержащих зависимости для определения массы, надежности (используется показатель надежности – ВБР), информационной производительности, целевой эффективности и затрат на проект модификации МЦА в составе модификации КА.

1. Модель оценки затрат на реализацию проекта МЦА. При формировании модели затрат на реализацию проекта создания МЦА рассматривается

состав модуля, включающий ЦСС, ССПИ, СТР и КОН (см. рис. 1). Модель затрат на создание МЦА $C_{МЦА}(\cdot)$ представляется в виде суммы затрат на подсистемы модуля:

$$*C_{МЦА}(\cdot) = \sum_{j=1}^4 C_j(\cdot),$$

где $C_j(\cdot)$ – функция, определяющая затраты на изготовление первого образца j -й подсистемы.

Зависимости для определения затрат $C_j(\cdot)$ на создание подсистем МЦА определяются в виде

$$C_{ЦСС}(\cdot) = \bar{C}_{ЦСС} M_{ЦСС}^{\delta_1} W_{ПЦСС}^{\delta_2};$$

$$C_{ССПИ}(\cdot) = \bar{C}_{ССПИ} M_{ССПИ}^{\delta_3} W_{ПССПИ}^{\delta_4};$$

$$C_{СТР}(\cdot) = \bar{C}_{СТР} M_{СТР}^{\delta_5} N_{СТР}^{\delta_6};$$

$$C_{СТР}(\cdot) = \bar{C}_{СТР} M_{СТР}^{\delta_5} N_{СТР}^{\delta_6};$$

$$W_{Пi} = \bar{W}_{Пi} e^{\gamma M_i},$$

где M – масса подсистемы; $W_{П}$ – энергопотребление подсистемы; N – хладопроизводительность СТР; \bar{C} , δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 , δ_6 , δ_7 , $\bar{W}_{Пi}$ и γ – статистические коэффициенты.

2. Зависимость для определения массы МЦА. Масса МЦА ($M_{МЦА}$) представляется в виде

$$M_{МЦА} = M_{ЦСС} + M_{ССПИ} + M_{СТР} + M_{КОН},$$

где $M_{ЦСС}$, $M_{ССПИ}$, $M_{СТР}$ и $M_{КОН}$ – соответственно масса ЦСС, ССПИ, СТР и КОН.

Динамическая статистическая модель для прогнозных исследований массы ЦСС $M_{ЦСС}(\cdot)$, в зависимости от отношения R/H и времени реализации техники t_i , имеет вид

$$M_{ЦСС}(\cdot) = f_1\left(\frac{R}{H}, t_i\right) = a_3(t_i) + a_4(t_i)\left(\frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H}\right);$$

$$a_3(t_i) = a_3^1 + a_3^2 t_i; \quad a_4(t_i) = a_4^1 + a_4^2 t_i,$$

где $\frac{R}{H}$ – относительное пространственное разрешение; $\frac{\bar{R}}{H}$ – среднее значение относительного пространственного разрешения; $a_3(t_i)$ и $a_4(t_i)$ – функции, определяющие значения коэффициентов модели от времени создания модификации КА; a_3^1 , a_3^2 , a_4^1 и

a_4^2 – статистические коэффициенты; t_i – момент времени, к которому проводится оценка выделенных показателей.

ССПИ представляется в виде двух подсистем: бортового устройства считывания информации (БУСИ) и радиокомплекса передачи информации (РКПИ).

Масса ССПИ $M_{ССПИ}$:

$$M_{ССПИ} = M_{БУСИ} + M_{РКПИ},$$

где $M_{БУСИ}$ – масса БУСИ; $M_{РКПИ}$ – масса РКПИ.

$$M_{БУСИ} = k_{БУСИ} M_{МЦА},$$

где $k_{БУСИ}$ – статистический коэффициент.

Масса типовой одноканальной РКПИ включает массу формирователя информационных потоков и передающей аппаратуры (ФПРД), антенно-фидерного устройства (АФУ) и прочих элементов (межблочной кабельной сети, вторичных источников питания, элементов КОН):

$$M_{РКПИ} = M_{ФПРД} + M_{АФУ} + M_{пр}; M_{ФПРД} = b_1 + b_2 P_{ПРД};$$

$$M_{АФУ} = f_{АФУ}(k_{АФУ}, N_A, M_A); M_{пр} = k_{пр} M_{АФУ},$$

где $P_{ПРД}$ – мощность передатчика; N_A – количество антенн; M_A – масса антенны; b_1, b_2 и $k_{пр}$ – статистические коэффициенты.

Масса системы терморегулирования $M_{СТР}$ и КОН $M_{КОН}$ определяются в виде

$$M_{СТР} = \bar{M}_{СТР} M_{СТР}^{\delta_1}; M_{КОН} = \bar{M}_{КОН} M_{КОН}^{\delta_2},$$

где $\bar{M}_{СТР}, \bar{M}_{КОН}, \delta_1$ и δ_2 – статистические коэффициенты.

3. Зависимости ВБР определяются в виде:

$$P_{ЦСС} = 1 - \bar{P}_{ЦСС} e^{-\eta_1 M_{ЦСС}};$$

$$P_{ССПИ} = 1 - \bar{P}_{ССПИ} e^{-\eta_2 M_{ССПИ}};$$

$$P_{СТР} = 1 - \bar{P}_{СТР} e^{-\eta_3 M_{СТР}};$$

$$P_{КОН} = 1 - \bar{P}_{КОН} e^{-\eta_4 M_{КОН}},$$

где $\bar{P}_{ЦСС}, \bar{P}_{ССПИ}, \bar{P}_{СТР}, \bar{P}_{КОН}, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ – статистические коэффициенты.

4. Информационная производительность $I_{ПРКА}$ на i -м уровне управления разработкой имеет вид:

$$I_{ПРКА} = \sum_{i=1}^n N_i^{ЦСС} N_{Ki} S_{Ki}^1,$$

где $N_i^{ЦСС}$ – количество типов ЦСС ($i = 1, \dots, n$); N_{Ki} – количество кадров на маршруте; S_{Ki}^1 – площадь поверхности Земли одного кадра.

5. Целевая эффективность модификации МЦА в составе КА определяется рядом показателей, например, количеством спектрозональных каналов $N_{зон}$, пространственным разрешением спектрозонального канала R , шириной полосы захвата ЦСС ΔL , количеством каналов передачи целевой информации $N_{кан}$, пропускной способностью радиоканала передачи целевой информации, информационной производительностью $I_{ПРМЦА}$ в течение САС КА.

Постановка задачи 3. Как показано в [12], при оптимизации характеристик модификации КА и МЦА в случае использования двухуровневой модели проводится адаптация (уточнение) проектных зависимостей, определяющих характеристики КА по данным проектных исследований МЦА на нижнем уровне управления разработкой. Направленная адаптация и уточнение функциональных связей обеспечивает согласование проектных решений для МЦА, принимаемых на двух уровнях. Адаптация проектной модели и уточнение функциональных связей КА на верхнем уровне осуществляются по данным исследований характеристик КА на нижнем уровне.

Формально математическая постановка задачи при наличии УКП в составе КА представляется в виде:

определить $\mathbf{\Pi}_{МЦА} \in G_{МЦА}(t_i)$ и $^* \mathbf{\Pi}_{МЦА} \in ^* G_{МЦА}(t_i)$ так, что $C_{\Sigma КА}(C_{МЦА}(\mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), \boldsymbol{\beta}(t_i)), \dots) \rightarrow \min$;

$$^* C_{МЦА}(^* \mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), ^* \boldsymbol{\beta}(t_i), \dots) \rightarrow \min;$$

$$\boldsymbol{\beta}(t_i) = A(\{\mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), C_{МЦА}(\cdot)\}) \quad (3)$$

и выполняется условие согласования проектных решений

$$|C_{МЦА}(\mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), \boldsymbol{\beta}(t_i)) - ^* C_{МЦА}(^* \mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), ^* \boldsymbol{\beta}(t_i))| \leq \Delta C^*; \quad (4)$$

$$|C_{\Sigma КА}^k(C_{МЦА}(\mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), \boldsymbol{\beta}(t_i))) - C_{\Sigma КА}^{k-1}(C_{МЦА}(\mathbf{\Pi}_{МЦА}(\cdot), \boldsymbol{\beta}(t_i)))| \leq \Delta C^{**}. \quad (5)$$

Выражение (3) описывает оператор направленной адаптации проектной модели модификации КА на верхнем уровне. Условие (4) – условие согласования решения задач на верхнем и нижнем уровнях, (5) – условие сходимости при реализации согласованного оптимизационного поиска на верхнем уровне. ΔC^* и ΔC^{**} – наперед заданные малые величины. Блок-схема алгоритма двухуровневой согласованной оптимизации (оценки) параметров модификации КА приведена на рис. 4. Поиск решения проводится итерационным методом. Анализ показывает, что при направленной адаптации уменьшается число итераций.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма двухуровневой согласованной оптимизации (оценки) параметров модификации космического аппарата при модернизации системы к моменту времени t_i

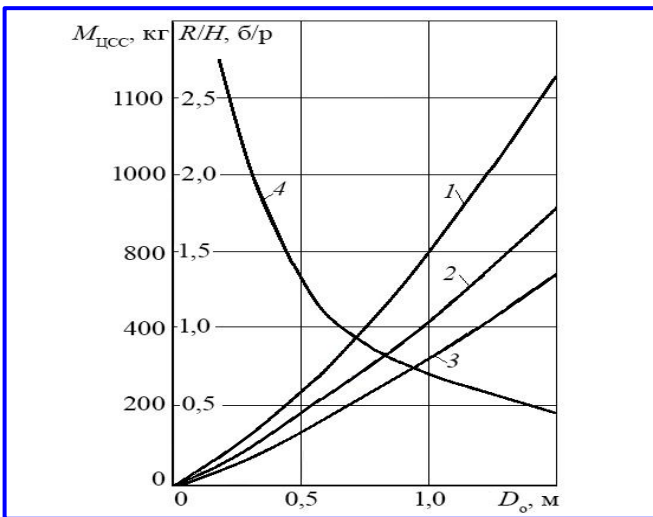


Рис. 5. Зависимости массы целевой съемочной системы и отношения R/H от диаметра апертуры D_0

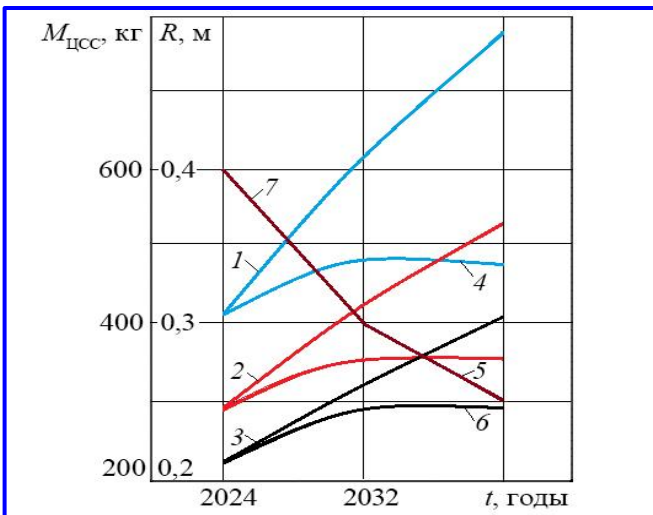


Рис. 6. Зависимость массы целевой съемочной системы ($M_{ЦСС}$) и пространственного разрешения (R) от момента времени (t_i)

Таким образом, применяемый метод позволяет оценить технико-экономические характеристики модификации КА с учетом особенностей ПКР заменяемой подсистемы (МЦА) и обеспечить необходимую точность исследований.

Основные результаты

Рассматривается модельная задача в предположении, что модификация КА включает ЦСС с оптико-электронным комплексом и при модернизации КС в прогнозируемый период решает ряд новых целевых задач. Предварительный анализ показал, что для решения новых целевых задач на модификации КА предпочтительнее применение комбинированного варианта оптико-электронного комплекса, работающего в панхроматическом и многозональном диапазоне длин волн. САС модификации КА составляет 5 лет, высота солнечно-синхронной орбиты – 450 км.

Постановка задачи: при заданных параметрах наземного сегмента $П_{НС}(t_i)$ и целевой нагрузки $Ц(t_i)$, характеристиках орбиты провести сравнительную оценку характеристик модификаций КА в прогнозируемый период при изменении целевой нагрузки и с учетом особенностей ПКР ЦСС МЦА к моменту времени t_i .

При решении модельной задачи использовались данные по характеристикам ранее созданных и существующих изделий-прототипов, а также по перспективным проектам, представленных в [14 – 25]. Рассмотрены три типа оптических схем ЦСС с оптико-электронными комплексами, различающиеся в основном схемными решениями и массой. Зависимость массы ЦСС и отношения R/H от диаметра апертуры D_0 при реализации оптических схем ЦСС (максимальной (1), средней (2) и минимальной (3)) приведены на рис. 5.

На рис. 6 приведена зависимость массы ЦСС ($M_{ЦСС}$) и пространственного разрешения (R) от момента времени (t_i). Показана динамика изменения массы ЦСС для оптических схем ЦСС при отсутствии темпов научно-технического прогресса (позиции 1, 2 и 3) и при их наличии (позиции 4, 5 и 6), а также изменение пространственного разрешения R (требуемые значения) в прогнозируемый период.

Зависимость затрат $C_{\Sigma КА}$ на создание КА (позиции 1, 2 и 3) и массы $M_{ЦСС}$ (4, 5 и 6) от момента времени t_i приведена на рис. 7. При построении зависимостей использованы расчетные значения с использованием разработанной методики.

На рис. 8 показана динамика изменения затрат на создание модификации КА в прогнозируемый период при замене подсистемы ЦСС. Зависимость 1 получена при сравнении минимальной и максимальной схемы ЦСС, 2 – средней и максимальной, 3 – средней и минимальной.

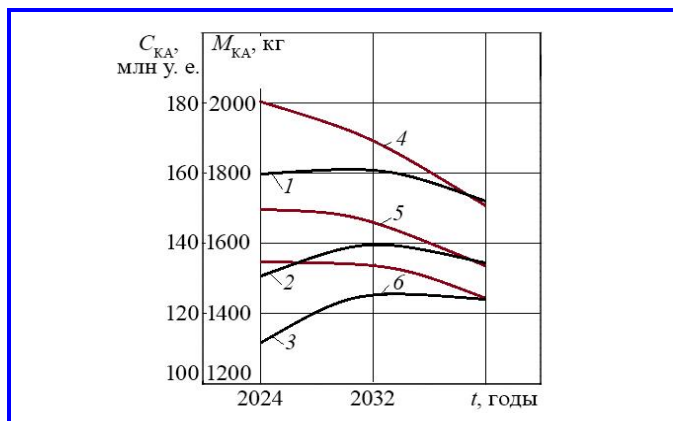


Рис. 7. Зависимость массы $M_{\text{КА}}$ и затрат $C_{\text{КА}}$ на создание космического аппарата от момента времени t_i

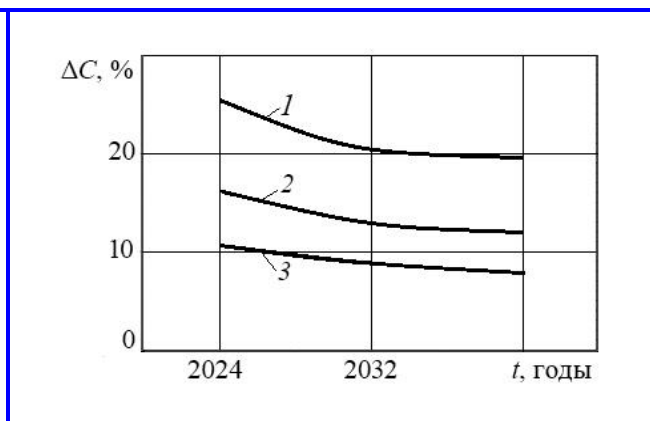


Рис. 8. Динамика изменения затрат на создание модификации космического аппарата в прогнозируемый период при замене подсистемы целевой съемочной системы

Заключение

Разработана методика, позволяющая провести сравнительную оценку характеристик модификаций КА ДЗЗ в прогнозируемый период с учетом динамики функциональных связей. В основу разработанной методики положены представления о многоуровневом управлении разработкой и реализации многоуровневой проектной модели. Используются двухуровневая модель управления разработкой, динамические статистические модели и статистический метод двухуровневой согласованной оптимизации. Метод включает решение задач оценки (оптимизации) параметров модификации КА и подсистемы (МЦА), а также задачу направленной адаптации проектных зависимостей верхнего уровня управления разработкой аппарата в целом.

Задачи приведены в детерминированной постановке. Разработаны алгоритмы проектных задач на верхнем и нижнем уровне управления разработкой, при этом реализуется процедура согласования проектных решений. Такой подход, с одной стороны, дает возможность учесть особенности ПКР заменяемых подсистем КА без расширения состава проектной модели, с другой стороны, оптимизация параметров подсистем аппарата на нижнем уровне управления (при детализации проектной модели) проводится с учетом динамики функциональных связей. Реализация такого подхода дает возможность организовать многовариантные исследования и обеспечивает определение рационального проектного решения за счет расширения области возможных решений.

С помощью разработанной методики на модельном примере в прогнозируемый период до 2040 года получены оценки характеристик модификации КА при замене типов ПКР ЦСС (максимальной, средней и минимальной) МЦА.

На рис. 8 показано, например, что в начальный момент прогнозируемого периода при применении в ЦСС оптической схемы (3) масса МЦА почти вдвое, а масса КА на четверть ниже, чем при использовании схемы (1). Суммарные затраты на создание модификации КА и подсистем при применении в ЦСС оптической схемы (1), в отличие от оптических схем (2) и (3), на 11 – 26 % выше. Это связано с большими габаритами ЦСА и сложностью изготовления внеосевых зеркал такой оптической схемы. Достоинством оптической схемы (1) является большое угловое поле зрения, что позволяет увеличить полосу захвата, а следовательно, при прочих равных условиях и информационную производительность КА.

Результаты сравнительной оценки, полученные на модельном примере, показали, что на характеристики модификаций КА в прогнозируемый период огромное влияние оказывают темпы научно-технического прогресса, что повышает эффективность разработки перспективных аппаратов. Полученные на модельном примере оценки технико-экономических характеристик могут быть использованы для детального анализа эффективности существующих и перспективных КС с целью прогнозирования их развития, расширения области применения, продления сроков использования.

Литература

1. Стома С. А. Геостационарная космическая система «Электро» (ГОМС): предпосылки создания и структура / С. А. Стома, Ю. В. Трифонов // Труды ВНИИЭМ. Гео-стационарный метеорологический космический аппарат «Электро». – 1998. – Т. 98. – С. 5–16.
2. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» №1 / Под редакцией Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, Ю. В. Трифонова [и др.]. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 147 с.

3. ВНИИЭМ – 70 лет истории предприятия / Под редакцией Л. А. Макриденко. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – 327 с.
4. Гусев А. А. Опыт разработки космической платформы для космических аппаратов «Метеор» / А. А. Гусев, И. Ю. Ильина, В. К. Саульский [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2013. – Т. 135. – № 4. – С. 3–12.
5. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2 / Под редакцией Л. А. Макриденко. – Москва : ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. – 158 с.
6. Макриденко Л. А. Космический аппарат природно-ресурсного, метеорологического и гелиогеофизического назначения «Ресурс-О» № 4 / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 149. – № 6. – С. 44–50.
7. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / Под редакцией Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, А. В. Горбунова, Р. С. Салихова, С. И. Терехова. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 129 с.
8. Макриденко Л. А. Космический аппарат «Метеор-3» – третье поколение отечественных аппаратов гидрометеорологического назначения серии «Метеор» / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 166. – № 5. – С. 49–56.
9. Макриденко Л. А. Комплексный унифицированный гидрометеорологический космический аппарат «Метеор-3М» № 1 / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 167. – № 6. – С. 57–66.
10. Макриденко Л. А. Космический комплекс «Ионозонд» / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 170. – № 3. – С. 40–48.
11. Унифицированная космическая платформа «Ресурс-УКП» / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов, [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 170. – № 3. – С. 49–57.
12. Матвеев Ю. А. Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин. – Москва : Изд-во МАИ, 2015. – 176 с.
13. Matveev Yu. A. Method of Predictive Studies of the Effectiveness of Spacecraft Modifications with Integrated Subsystem Replacement / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // Solar System Research. – 2016. – Vol. 50. – No. 7. – P. 604–610.
14. Севастьянов Н. Н. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко [и др.] // Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1. – № 3. – С. 15–23.
15. Занин К. А. Основные направления развития зарубежных оптико-электронных космических систем дистанционного зондирования Земли (обзор) / К. А. Занин, И. В. Москатиных // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. – 2019. – № 2/44. – С. 28–36.
16. Бакланов А. И. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» / А. И. Бакланов, В. Д. Блинов, И. А. Горбунов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 30–35.
17. Ламзин В. В. Исследование характеристик оптико-электронной космической системы дистанционного зондирования Земли при модернизации в планируемый период / В. В. Ламзин // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 5. – С. 46–55.
18. Гарбук С. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон. – Москва : Изд-во А и Б, 1997. – 296 с.
19. Matveev Yu. A. The Objective of Defining a Rational Programme for the Modernization of the Space System for Remote Sensing of the Earth During the Planned Period / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // XLIII Academic space conference: dedicated to the memory of academician S. P. Korolev and other outstanding russian scientists – pioneers of space exploration (Moscow, Russia, January 28 – February 01, 2019); Journal AIP Conference Proceedings 2171, 110021 (2019); American Institute of Physics Inc.; Published Online: 15 November 2019. – P. 110021. – DOI: 10.1063/1.5133255. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43213976&ysclid=Isyev3shu1634420354>.
20. Космическая съемка Земли. Спутники оптической съемки Земли с высоким разрешением / Под редакцией А. А. Кучейко. – Москва : ИПРЖР, 2001. – 136 с.
21. Бакланов А. И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения. Часть 1 / А. И. Бакланов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 17–28.
22. Бакланов А. И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения. Часть 2 / А. И. Бакланов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 14–27.
23. Ламзин В. А. Космические системы дистанционного зондирования Земли (технические характеристики): Учебное пособие / В. А. Ламзин, В. В. Ламзин. – Москва : Изд-во МАИ, 2015. – 176 с.
24. Занин К. А. Перспективы развития космических систем оптико-электронного наблюдения с учётом совершенствования полупроводниковых приёмников изображений / К. А. Занин, И. В. Москатиных // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. – 2022. – № 3. – С. 5–10.
25. Занин К. А. Современные КА ДЗЗ. Часть 2. Особенности применения коммерческих КА оптико-электронного наблюдения для решения задач в интересах государственных и военных потребителей / К. А. Занин, Н. Н. Клименко, И. В. Москатиных // Воздушно-космическая сфера. – 2020. – № 3. – С. 90–100.

Поступила в редакцию 07.12.2023

*Владимир Алексеевич Ламзин, кандидат технических наук, доцент,
т. +7 (916) 846-58-36, e-mail: 8465836@mail.ru.*

*Владимир Владимирович Ламзин, доктор технических наук, профессор,
т. +8 (499) 158-42-88, e-mail: 8465836@mail.ru.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

METHODOLOGY FOR COMPARATIVE EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS OF SPACECRAFT MODIFICATIONS IN THE FORECAST PERIOD TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF FUNCTIONAL CONNECTIONS

V. A. Lamzin, V. V. Lamzin

A methodology is proposed which allows a comparative evaluation of the characteristics of Earth remote sensing spacecraft modifications in the forecast period. Changes in the target load and the dynamics of functional relationships are taken into account. The developed methodology is based on the concepts of multi-level management of the development and implementation of a multi-level project model. The design tasks of evaluating (optimizing) the parameters of the modification of the spacecraft and the module of the target equipment, as well as the task of directed adaptation of the design dependencies are presented in a deterministic formulation. Algorithms for solving design problems have been developed, and a procedure for approving design solutions is being implemented. This approach, on the one hand, allows us to take into account the design features of the subsystems of the spacecraft being replaced without expanding the composition of the computational model. On the other hand, the evaluation (optimization) of the parameters of the subsystems of the apparatus when detailing the design model is carried out taking into account the dynamics of functional relationships. The implementation of this approach makes it possible to organize multivariate studies and ensures the definition of a rational design solution by expanding the range of possible solutions. The estimates of the characteristics of spacecraft modifications obtained by the model example can be used for a detailed analysis of the effectiveness of promising space systems for remote sensing of the Earth in order to predict their development and expand the scope of application.

Key words: Earth remote sensing, space system, spacecraft, modernization, modification, forecasting, replaceable subsystems, design model, parameters.

References

1. Stoma S. A. Geostationary space system Electro (GOMS): development background and structure / S. A. Stoma, Iu. V. Trifonov // VNIIEEM Proceedings. – 1998. – Vol. 98. – P. 5–16.
2. Meteor-3M space system for hydrometeorological and oceanographic support comprising Meteor-M No. 1 satellite / edited by L. A. Makridenko, S. N. Volkov, Iu. V. Trifonov [et al.]. – Moscow : FGUE ‘NPP VNIIEEM’, 2009. – 147 p.
3. VNIIEEM: a 70-year history / Edited by L. A. Makridenko. – Moscow : FGUE ‘NPP VNIIEEM’, 2011. – 327 p.
4. Gusev A. A. Experience of development of a space platform for Meteor satellites / A. A. Gusev, I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2013. – Vol. 135. – № 4. – P. 3–12.
5. Hydrometeorological and oceanographic space system Meteor-3M comprising Meteor-M № 2 / Edited by L. A. Makridenko. – Moscow : JSC ‘VNIIEEM Corporation’, 2014. – 158 p.
6. Makridenko L. A. Meteorological, helio-geophysical and natural resources monitoring satellite Resurs-O № 4 / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2015. – Vol. 149. – № 6. – P. 44–50.
7. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V-IK / Edited by L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, R. S. Salikhov, S. I. Terekhov. – Moscow : JSC ‘VNIIEEM Corporation’, 2017. – 129 p.
8. Makridenko L. A. Meteor-3 satellite: third generation of national hydrometeorological satellites of Meteor series / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2018. – Vol. 166. – No. 5. – P. 49–56.
9. Makridenko L. A. Integrated unified hydrometeorological satellite Meteor-3M № 1 / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2018. – Vol. 167. – № 6. – P. 57–66.
10. Makridenko L. A. «Ionozond» space system / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2019. – Vol. 170. – No. 3. – P. 40–48.
11. Makridenko L. A. Unified space platform ‘Resurs-UKP’ / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2019. – Vol. 170. – No. 3. – P. 49–57.
12. Matveev Yu. A. Fundamentals of designing of the Earth remote sensing spacecraft modifications / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin. – Moscow : MAI Publ., 2015. – 176 p.
13. Matveev Yu. A. Method of Predictive Studies of the Effectiveness of Spacecraft Modifications with Integrated Subsystem Replacement / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // Journal Solar System Research. – 2016. – Vol. 50. – No. 7. – P. 604–610.

14. Sevast'yanov N. N. Analysis of modern possibilities of creating small spacecraft for Earth remote sensing / N. N. Sevast'yanov, V. N. Branec, V. A. Panchenko [at all] // Journal Proceeding of MIPT. – 2009. – Vol. 1. – No. 3. – P. 15–23.
15. Zanin K. A. Principle directions of development of foreign Earth remote sensing electro-optical space systems (review) / K. A. Zanin, I. V. Moskatinyev // Journal Vestnik of NPO named after S. A. Lavockin. – 2019. – No. 2(44). – P. 28–36.
16. Baklanov A. I. High-resolution equipment for the advanced spacecraft «ResursPM» / A. I. Baklanov, V. D. Blinov, I. A. Gorbunov [at all] // Journal Vestnik of Samara State Aerospace University. – 2016. – Vol. 15. – No. 2. – P. 30–35.
17. Lamzin V. V. Investigation of the characteristics of Earth remote sensing electro-optical space systems during modernization in the planned period / V. V. Lamzin // Journal Vestnik of MAI. – 2009. – Vol. 16. – No 5. – P. 46–55.
18. Garbuk S. V. Earth remote sensing space systems / S. V. Garbuk, V. E. Gershenson. – Moscow : Publishing house A and B, 1997. – 296 p.
19. Matveev Yu. A. The Objective of Defining a Rational Programme for the Modernization of the Space System for Remote Sensing of the Earth During the Planned Period / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // XLIII Academic space conference: dedicated to the memory of academician S. P. Korolev and other outstanding russian scientists – pioneers of space exploration (Moscow, Russia, January 28 – February 01, 2019); Journal AIP Conference Proceedings 2171, 110021 (2019); American Institute of Physics Inc.; Published Online: 15 November 2019. – P. 110021. – DOI: 10.1063/1.5133255. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43213976&ysclid=lsyev3shu1634420354>.
20. Space photography of the Earth. High-resolution optical Earth survey satellites / Edited by A. A. Kucheyko. – Moscow : IPRZR, 2001. – 136 p.
21. Baklanov A. I. New horizons of high-resolution optical-electronic Earth observation space systems. Part 1 / A. I. Baklanov // Rocket and space instrumentation and information systems. – 2018. – Vol. 5. – Issue 3. – P. 17–28.
22. Baklanov A. I. New horizons of high-resolution optical-electronic Earth observation space systems. Part 2 / A. I. Baklanov // Rocket and space instrumentation and information systems. – 2018. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 14–27.
23. Lamzin V. A. Space systems for remote sensing of the Earth (technical characteristics): Textbook / V. A. Lamzin, V. V. Lamzin. – Moscow : Publishing House of MAI, 2015. – 176 p.
24. Zanin K. A. Prospects for the development of space systems of optical-electronic observation, taking into account the improvement of semiconductor image receivers / K. A. Zanin, I. V. Moskatinyev // Bulletin of the NPO named after S. A. Lavochkin. – 2022. – № 3. – P. 5–10.
25. Zanin K. A. Features of the use of commercial optical-electronic surveillance spacecraft to solve problems in the interests of government and military consumers / K. A. Zanin, N. N. Klimenko, I. V. Moskatinyev // Aerospace sphere. – 2020. – № 3. – P. 90–100.

*Vladimir Alekseevich Lamzin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
t. +7 (916) 846-58-36, e-mail: 8465836@mail.ru.*

*Vladimir Vladimirovich Lamzin, Doctor of Technical Sciences, Professor,
t. 8 (499) 158-42-88, e-mail: 8465836@mail.ru.*

(Moscow Aviation Institute (National Research University)).