

## **Методические основы прогнозных исследований модификаций космических аппаратов**

**Ламзин В.А.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия  
e-mail: [8465836@mail.ru](mailto:8465836@mail.ru)*

### **Аннотация**

Приводятся методические основы прогнозных исследований перспективных КА (модификаций КА) в составе космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при модернизации к заданному моменту времени. Используется метод многоуровневой согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей, в основе которого схема двухуровневой организации проектных исследований и двухуровневая проектная модель. Рассматривается задача оптимизации параметров модификации модуля МЦА при замене его подсистем с учетом требований к надежности модуля. Представлен алгоритм решения задачи.

Прогнозные исследования с использованием разработанных методических основ проводятся с учетом динамики функциональных связей, технико-экономических ограничений, позволяют количественно оценить характеристики альтернативных вариантов модуля МЦА и КА в целом, найти их рациональные значения, установить закономерности развития техники и технологий.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, модернизация, модификация, прогнозные исследования, методические основы, технико-экономическая модель, алгоритм, параметры.

## **Введение**

Анализ перспектив развития КС ДЗЗ на ближайшее десятилетие показывает, что основное место будут занимать разработки малоразмерных КА. Одновременно с целью повышения эффективности техники при ограниченных затратах широкое применение найдут модификации существующих аппаратов, созданные с учетом критических технологий, эффективных проектно-конструкторских решений (ПКР), комплексной замены подсистем и т.д. В таком случае необходимы прогнозные исследования, позволяющие повысить эффективность разработки перспективных изделий, обоснованно определять рациональные ПКР, формировать программы совершенствования КС ДЗЗ. Создание методических основ прогнозных исследований является важной задачей, так как такие исследования проводятся на начальном этапе проектных работ, а полученные данные используются для обоснования технического задания на новые разработки.

В статье представлены методические основы прогнозных исследований характеристик модификаций КА ДЗЗ при комплексной замене подсистем, рассматриваются особенности применения таких основ, что обусловлено необходимостью учета функциональных связей как горизонтальных, так и вертикальных. Средством исследования модификаций является метод

двухуровневой согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей [1 – 6]. В качестве примера рассматривается задача оптимизации параметров модификации модуля целевой аппаратуры (МЦА) при замене его подсистем с учетом требований к надежности модуля.

### 1 Постановка задачи оптимизации параметров модификации модуля МЦА

Структура КА ДЗЗ приведена на рис. 1.

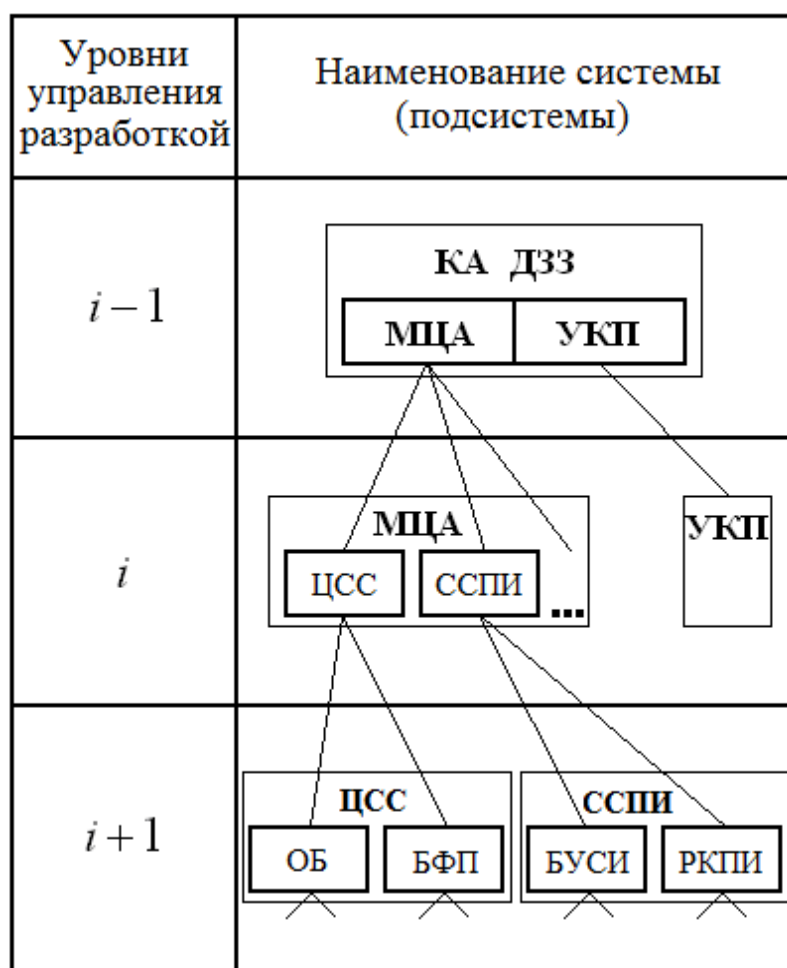


Рис. 1. Структура КА ДЗЗ

Предполагается, что реализуется модульный принцип создания, причем аппарат рассматривается как объект, включающий модуль МЦА и унифицированную космическую платформу (УКП). Заменяемыми подсистемами

модуля МЦА являются целевая съемочная система (ЦСС) и система сбора и передачи информации (ССПИ). ЦСС включает два основных блока: объектив (ОБ) и блок фокальной плоскости (БФП). ССПИ состоит из блока управления и считывания информации (БУСИ) и радиокomплекса передачи целевой информации (РКПИ). При проведении исследований рассматривается КА ДЗЗ с оптико-электронной целевой аппаратурой.

Формулировка задачи исследования: при заданных параметрах наземного сегмента и унифицированной космической платформе, типах целевой нагрузки провести исследования возможности повышения эффективности модификаций модуля МЦА в составе КА ДЗЗ при замене подсистем и с учетом требований к надежности модуля; исследовать влияние единичной замены подсистемы и комплексной замены подсистем модуля МЦА на технико-экономические характеристики модификаций модуля в составе аппарата.

Для исследования параметров модификации модуля МЦА в составе КА при замене его подсистем используется двухуровневая схема оптимизации параметров модификации модуля и заменяемых подсистем, двухуровневая модель МЦА. При поиске рационального решения используется метод двухуровневой оптимизации при статистическом учете функциональных связей [2, 5].

Проектные исследования охватывают верхний ( $i-1$ ) и нижние ( $i$ ) и ( $i+1$ ) уровни управления разработкой. На верхнем ( $i-1$ )-м уровне управления разработкой КА рассматривается как объект, включающий два модуля: МЦА и УКП. Предполагается, что параметры модуля УКП известны, а детальный проектный

анализ модуля МЦА при замене его подсистем проводится на нижнем ( $i$ -м) – м уровне управления разработкой.

В статье рассматриваются задачи оптимизации параметров модификации модуля МЦА и его заменяемых подсистем (ЦСС и ССПИ) на ( $i$ -м) и ( $i+1$ -м) уровнях, проводится согласованная двухуровневая оптимизация параметров модуля и его заменяемых подсистем.

С учетом структуры (рис. 1) задача оптимизации параметров модификации модуля МЦА в составе КА ДЗЗ на верхнем ( $i$ -м) уровне управления разработкой при комплексной замене подсистем модуля представляется в виде

$${}^i C_{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{пр}}^{\text{МЦА}}, \beta(t_{\text{пр}})) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$${}^i M_{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{пр}}^{\text{МЦА}}, \beta(t_{\text{пр}})) \leq {}^i M_{\text{МЦА}}^{\text{зд}};$$

$${}^i P_{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{пр}}^{\text{МЦА}}) \geq {}^i P_{\text{МЦА}}^{\text{зд}};$$

$${}^i W_{\text{МЦА}}(I_{\text{прМЦА}}, \beta(t_{\text{пр}})) \geq {}^i W_{\text{МЦА}}^{\text{зд}};$$

$$\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{пр}}^{\text{МЦА}} \in {}^i G({}^{i-1} \Pi);$$

$$T = T^{\text{зд}};$$

$$t_{\text{пр}} \in \langle T \rangle;$$

$$\Pi_{\text{УКП}}(\cdot) = \Pi_{\text{УКП}}^{\text{зд}};$$

$$\Pi_{\text{НС}}(\cdot) = \Pi_{\text{НС}}^{\text{зд}},$$

где  ${}^i C_{\text{МЦА}}(\cdot)$  – функция, определяющая суммарные затраты на разработку и создание модуля МЦА с учетом заменяемых подсистем ЦСС и ССПИ, определяемая

на  $i$ -м уровне управления разработкой;  ${}^i M_{\text{МЦА}}(\cdot)$ ,  ${}^i P_{\text{МЦА}}(\cdot)$ ,  ${}^i W_{\text{МЦА}}(\cdot)$  – соответственно масса, вероятность безотказной работы (ВБР) в течение срока активного существования (САС) и функциональная эффективность МЦА, определяемые на  $i$ -м уровне управления разработкой соответственно;  $M_{\text{пр}}^{\text{МЦА}}$  – масса прочих подсистем МЦА (система терморегулирования, конструкция и пр.) определяемые на  $i$ -м уровне управления разработкой;  $\beta(t_{\text{пр}})$  – вектор статистических коэффициентов проектной модели (вектор так называемых определяющих параметров  $(\beta(t_{\text{пр}}) = \beta(\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, t_{\text{пр}}))$ , которые зависят от времени реализации проекта  $t_{\text{пр}}$ );  $M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}$ ,  $M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}$  – масса ЦСС и ССПИ соответственно;  $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}$ ,  $\Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}$  – векторы параметров, определяющих состав и структуру ЦСС и ССПИ соответственно;  $T$  – период функционального применения МЦА в составе КА ДЗЗ;  $\Pi_{\text{УКП}}(\cdot)$ ,  $\Pi_{\text{НС}}(\cdot)$  – параметры унифицированной космической платформы и наземного сегмента соответственно.

При оптимизации параметров модификации модуля МЦА в составе КА ДЗЗ на  $i$ -м уровне управления разработкой полагается, что параметры наземного сегмента и УКП заданы. Ограничения  ${}^{i-1} M_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}$ ,  ${}^{i-1} P_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}$ ,  ${}^{i-1} W_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}$  определяются на верхнем ( $i-1$ -м) уровне управления разработкой.

Задача (1) является многокритериальной и многопараметрической.

При записи многокритериальной задачи используется метод ограничений. Критерием – основным показателем эффективности принимаемого проектного решения – являются затраты на разработку и создание модификации КА. На другие

показатели эффективности ( ${}^i M_{\text{МЦА}}, {}^i P_{\text{МЦА}}, {}^i W_{\text{МЦА}}$ ) наложены ограничения типа неравенств. Такой подход дает возможность учесть влияние новых требований  ${}^{i-1} M_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}, {}^{i-1} P_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}, {}^{i-1} W_{\text{МЦА}}^{\text{зд}}$  на выбор проектных решений модификации МЦА в составе КА ДЗЗ.

В случае создания модификации модуля МЦА проводится замена подсистем на новые с тем, чтобы повысить эффективность модуля и КА в целом. Выбираемые параметры –  $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}$ . Таким образом, задача проектирования является многопараметрической, причем часть выбираемых (варьируемых) параметров имеет целочисленный характер ( $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}$ ).

Так как при решении задачи (1) используются опытные данные (статистика по образцам-прототипам), то вектор статистических коэффициентов проектной модели  $\beta(t_{\text{пр}})$  являются случайной величиной, тогда задачу (1) следует рассматривать как стохастическую проектную задачу [1, 6]. При решении такой задачи в чистых стратегиях, выбирают проектные параметры из допустимой области таким образом, чтобы математическое ожидание затрат на разработку и создание модификации МЦА в составе КА ДЗЗ было минимально.

В статье, в качестве примера формирования алгоритма и проектной модели, задача (1) рассматривается в детерминированной постановке.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма решения задачи (1). Как видно из рис. 2 для решения задачи используется расчлененная оптимизация целочисленных параметров ( $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}$ ) и непрерывных параметров ( $M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}$ ).

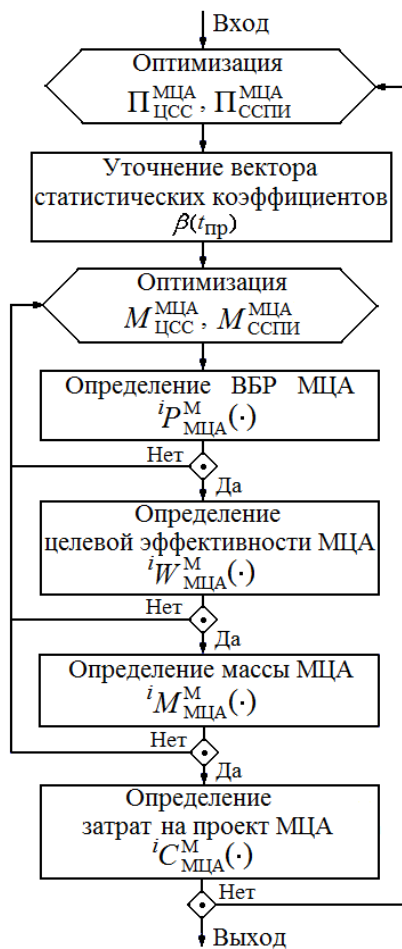


Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма решения задачи (1)

При проведении прогнозных исследований определяются рациональные параметры модификации модуля МЦА в составе КА ДЗЗ при которых выполняются технико-экономические ограничения, а затраты на проект создания модуля к моменту  $t_{пр}$  будут минимальны.

Далее остановимся на структуре проектной модели на  $i$ -м уровне управления разработкой.

## 1.2 Основные соотношения проектной модели

### ( $i$ -й уровень управления разработкой)



Для решения задачи (1) формируется структура проектной модели в соответствии с разработанным алгоритмом (см. рис. 2). Она включает четыре основных блока, включающих зависимости для определения массы, ВБР, функциональной эффективности и затрат на разработку и создание модификации МЦА в составе КА ДЗЗ.

1. Зависимость для определения массы модуля МЦА при  $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} = \Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}}$  и

$\Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} = \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}}$  имеет вид

$$M_{\text{МЦА}}(M_{\text{ЦСС}}, M_{\text{ССПИ}}) = M_{\text{ЦСС}} + M_{\text{ССПИ}}.$$

2. При оценке ВБР модификации МЦА используются соотношения, определяются по методике, приведенной в [7]:

$$P_{\text{МЦА}}(\cdot) = P(M_{\text{ЦСС}}) \cdot P(M_{\text{ССПИ}});$$

$$P(M_{\text{ЦСС}}) = 1 - \bar{P}_{\text{ЦСС}} \cdot \exp(-\bar{\bar{P}}_{\text{ЦСС}} \cdot M_{\text{ЦСС}});$$

$$P(M_{\text{ССПИ}}) = 1 - \bar{P}_{\text{ССПИ}} \cdot \exp(-\bar{\bar{P}}_{\text{ССПИ}} \cdot M_{\text{ССПИ}}),$$

где  $\bar{P}_{\text{ЦСС}}$ ,  $\bar{\bar{P}}_{\text{ЦСС}}$ ,  $\bar{P}_{\text{ССПИ}}$  и  $\bar{\bar{P}}_{\text{ССПИ}}$  – статистические коэффициенты.

3. Функциональная эффективность модификации МЦА в составе КА определяется рядом показателей, например, количеством спектрозональных каналов  $N_{\text{кан}}$ , разрешением спектрозонального канала  $R$ , шириной полосы захвата ЦСС  $\Delta L$ , количеством каналов передачи целевой информации  $N_{\text{кан}}^{\text{РКПИ}}$ , пропускной способностью радиоканала передачи целевой информации  $C$ , информационной производительностью  $I_{\text{ПРМЦА}}$  за срок активного существования КА и др.

Для определения информационной производительности используется соотношение

$${}^i I_{\text{ПРМЦА}}(\cdot) = \bar{I} \cdot M_{\text{МЦА}}^{\alpha},$$

где  $\bar{I}$  и  $\alpha$  – статистические коэффициенты, определяются по методике, приведенной в [8].

4. Зависимости для определения затрат на разработку и создание проекта модификации модуля МЦА представляются в виде

$$C_{\text{МЦА}}^{\text{М}} = C_{\text{Р МЦА}}^{\text{М}}(\cdot) + C_{\text{С МЦА}}^{\text{М}}(\cdot);$$

$$C_{\text{Р МЦА}}^{\text{М}}(\cdot) = K_{\text{Р}} \cdot C_{\text{С МЦА}}^{\text{М}}(\cdot);$$

$$C_{\text{С МЦА}}^{\text{М}}(\cdot) = C_{\text{СЦСС}}(\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}) + C_{\text{СССПИ}}(\Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}).$$

При  $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} = \Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА} \text{зд}}$  и  $\Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} = \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА} \text{зд}}$  для оценки затрат на создание (изготовление) ЦСС и ССПИ используются зависимости вида []:

$$C_{\text{СЦСС}}(\cdot) = \bar{C}_{\text{ЦСС}} \cdot M_{\text{ЦСС}}^{\beta_1};$$

$$C_{\text{СССПИ}}(\cdot) = \bar{C}_{\text{ССПИ}} \cdot M_{\text{ССПИ}}^{\beta_2}.$$

Здесь  $K_{\text{Р}}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – статистические коэффициенты, определяемые на основе опытных данных.

## 2 Постановка задачи оптимизации параметров заменяемых подсистем

Задача оптимизации (оценки) параметров заменяемых подсистем (ЦСС и ССПИ) модуля МЦА на нижнем ( $i+1$ -м) уровне управления разработкой представляется в виде

$${}^{i+1}C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, \Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, {}^{i+1}\beta(t_{\text{пр}})) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$${}^{i+1}M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, \Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, {}^{i+1}\beta(t_{\text{пр}})) \leq {}^i M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}};$$

$${}^{i+1}P_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, \Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}) \geq {}^i P_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}};$$

$${}^{i+1}W_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^i W_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}};$$

$$\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, \Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}} \in {}^{i+1}G(\cdot);$$

$${}^{i+1}C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, \Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, {}^{i+1}\beta(t_{\text{пр}})) \rightarrow \min; \quad (3)$$

$${}^{i+1}M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, \Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, {}^{i+1}\beta(t_{\text{пр}})) \leq {}^i M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}};$$

$${}^{i+1}P_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, \Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}) \geq {}^i P_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}};$$

$${}^{i+1}W_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^i W_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}^{\text{ЗД}}};$$

$$\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, \Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}} \in {}^{i+1}G(\cdot),$$

где  ${}^{i+1}C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  и  ${}^{i+1}C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  – соответственно функции, определяющие суммарные затраты на разработку и создание ЦСС и ССПИ модуля МЦА, определяемые на  $i+1$ -м уровне управления разработкой;  ${}^{i+1}M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  и  $M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  – соответственно масса ЦСС и ССПИ модуля МЦА, определяемые на  $i+1$ -м уровне управления разработкой;  ${}^{i+1}P_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  и  $P_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  – соответственно вероятность безотказной работы (ВБР) ЦСС и ССПИ модуля МЦА, определяемые на  $i+1$ -м

уровне управления разработкой;  ${}^{i+1}W_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  и  $W_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot)$  – соответственно функциональная эффективность ЦСС и ССПИ модуля МЦА, определяемые на  $i+1$ -м уровне управления разработкой;  ${}^{i+1}\beta(t_{\text{пр}})$  – вектор статистических коэффициентов проектной модели на  $i+1$ -м уровне управления разработкой;  $M_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}$ ,  $M_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}$ ,  $M_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}$ ,  $M_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}$  – соответственно масса объекта, блока фокальной плоскости, блока управления и считывания информации, радиокomплекса передачи целевой информации;  $\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}$ ,  $\Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}$ ,  $\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}$ ,  $\Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}$  – векторы параметров, определяющих состав и структуру объекта, блока фокальной плоскости, блока управления и считывания информации, радиокomплекса передачи целевой информации соответственно.

Задачи проектирования (2) и (3) на  $i+1$ -м уровне управления разработкой многокритериальные и многопараметрические. Ограничения по массе, ВБР и функциональной эффективности определяются на верхнем  $i$ -м уровне управления разработкой при решении задачи (1). Алгоритм решения проектных задач (2) и (3) строится аналогично алгоритму решения задачи (1).

## 2.1 Основные соотношения проектных моделей

### ( $i+1$ -й уровень управления разработкой)

Для определения затрат на разработку и создание заменяемых подсистем ЦСС и ССПИ модуля МЦА используются зависимости

$$C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} = C_{\text{РЦСС}}(\cdot) + C_{\text{СЦСС}}(\cdot);$$

$$C_{\text{РЦСС}}(\cdot) = K_{\text{Р}}^1 \cdot C_{\text{СЦСС}}(\cdot);$$

$$C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot) = C_{\text{СОБ}}(\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{ОБ}}) + C_{\text{СБФП}}(\Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{БФП}});$$

$$C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} = C_{\text{РССПИ}}(\cdot) + C_{\text{СССПИ}}(\cdot);$$

$$C_{\text{РССПИ}}(\cdot) = K_{\text{Р}}^2 \cdot C_{\text{СССПИ}}(\cdot);$$

$$C_{\text{СССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot) = C_{\text{СБУСИ}}(\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{БУСИ}}) + C_{\text{СРКПИ}}(\Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{РКПИ}}).$$

При  $\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}} = \Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦССЗд}}$ ,  $\Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}} = \Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦССЗд}}$ ,  $\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}} = \Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИЗд}}$ ,  $\Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}} = \Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИЗд}}$  для оценки

затрат на создание (изготовление) ЦСС и ССПИ используются зависимости вида []:

$$C_{\text{СОБ}}(\cdot) = \bar{C}_{\text{ОБ}} \cdot M_{\text{ОБ}}^{\gamma_1};$$

$$C_{\text{СБФП}}(\cdot) = \bar{C}_{\text{БФП}} \cdot M_{\text{БФП}}^{\gamma_2};$$

$$C_{\text{СБУСИ}}(\cdot) = \bar{C}_{\text{БУСИ}} \cdot M_{\text{БУСИ}}^{\gamma_3};$$

$$C_{\text{СРКПИ}}(\cdot) = \bar{C}_{\text{РКПИ}} \cdot M_{\text{РКПИ}}^{\gamma_4}.$$

Здесь  $K_{\text{Р}}^1$ ,  $K_{\text{Р}}^2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  и  $\gamma_4$  – статистические коэффициенты, определяемые на основе опытных данных.

В этом случае масса МЦА определяется в виде

$$M_{\text{ЦСС}}(M_{\text{ОБ}}, M_{\text{БФП}}) = M_{\text{ОБ}} + M_{\text{БФП}};$$

$$M_{\text{ССПИ}}(M_{\text{БУСИ}}, M_{\text{РКПИ}}) = M_{\text{БУСИ}} + M_{\text{РКПИ}}.$$

При оценке ВБР ЦСС и ССПИ используются соотношения []:

$$P_{\text{МЦА}}(\cdot) = P(M_{\text{ЦСС}}) \cdot P(M_{\text{ССПИ}});$$

$$P_{\text{МЦА}}(\cdot) = P(M_{\text{ЦСС}}) \cdot P(M_{\text{ССПИ}});$$

$$P(M_{\text{ЦСС}}) = 1 - \bar{P}_{\text{ЦСС}} \cdot \exp(-\bar{P}_{\text{ЦСС}} \cdot M_{\text{ЦСС}}) ;$$

$$P(M_{\text{ССПИ}}) = 1 - \bar{P}_{\text{ССПИ}} \cdot \exp(-\bar{P}_{\text{ССПИ}} \cdot M_{\text{ССПИ}}) ,$$

$$P(M_{\text{ЦСС}}) = 1 - \bar{P}_{\text{ЦСС}} \cdot \exp(-\bar{P}_{\text{ЦСС}} \cdot M_{\text{ЦСС}}) ;$$

$$P(M_{\text{ССПИ}}) = 1 - \bar{P}_{\text{ССПИ}} \cdot \exp(-\bar{P}_{\text{ССПИ}} \cdot M_{\text{ССПИ}}) ,$$

где  $\bar{P}_{\text{ЦСС}}$ ,  $\bar{P}_{\text{ССПИ}}$ ,  $\bar{P}_{\text{ЦСС}}$  и  $\bar{P}_{\text{ССПИ}}$  – статистические коэффициенты.

### 3 Задача двухуровневой согласованной оптимизации параметров модификации МЦА при комплексной замене его подсистем

Задача двухуровневой согласованной оптимизации параметров модуля МЦА при комплексной замене подсистем (ЦСС и ССПИ) записывается в виде

определить  $\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} \in {}^i G (\cdot)$ ;

$\Pi_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{ОБ}}^{\text{ЦСС}}, \Pi_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}}, M_{\text{БФП}}^{\text{ЦСС}} \in {}^{i+1} G (\cdot)$ ;

$\Pi_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{БУСИ}}^{\text{ССПИ}}, \Pi_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}}, M_{\text{РКПИ}}^{\text{ССПИ}} \in {}^{i+1} G (\cdot)$ ,

такие, что  ${}^i C_{\text{МЦА}} ({}^i C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} (\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}) + {}^i C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} (\Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}})) = ({}^i C_{\text{МЦА}})_{\min}$ ;

$${}^{i+1} C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} (\Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}) = ({}^{i+1} C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}})_{\min} ;$$

$${}^{i+1} C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} (\Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}) = ({}^{i+1} C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}})_{\min} ;$$

$$\left| {}^{i+1} C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} (\cdot) - {}^i C_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}} (\cdot) \right| \leq \Delta C_{\text{ЦСС}}^* ; \quad (4)$$

$$\left| {}^{i+1} C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} (\cdot) - {}^i C_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} (\cdot) \right| \leq \Delta C_{\text{ССПИ}}^{**} ; \quad (5)$$

$$\left| {}^i C_{\text{МЦА}} (\cdot)_{(k)} - {}^i C_{\text{МЦА}} (\cdot)_{(k-1)} \right| \leq \Delta C ; \quad (6)$$

$${}^i G(\cdot) = \left\{ \begin{array}{l} \Pi_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}, \Pi_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}, M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}} : \\ {}^i M_{\text{МЦА}}(\cdot) \leq {}^{i-1} M_{\text{МЦА}}^{\text{ЗД}}; {}^i P_{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^{i-1} P_{\text{МЦА}}^{\text{ЗД}}; {}^i W_{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^{i-1} W_{\text{МЦА}}^{\text{ЗД}} \end{array} \right\};$$

$${}^{i+1} G(\cdot) = \left\{ \begin{array}{l} \Pi_{\text{ОБ}}, M_{\text{ОБ}}, \Pi_{\text{БФП}}, M_{\text{БФП}}, \Pi_{\text{БУСИ}}, M_{\text{БУСИ}}, \Pi_{\text{РКПИ}}, M_{\text{РКПИ}} : \\ {}^{i+1} M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \leq {}^i M_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА ЗД}}; \\ {}^{i+1} M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \leq {}^i M_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА ЗД}}; \\ {}^{i+1} P_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^i P_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА ЗД}}; {}^{i+1} P_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^i P_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА ЗД}}; \\ {}^{i+1} W_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^i W_{\text{ЦСС}}^{\text{МЦА ЗД}}; {}^{i+1} W_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА}}(\cdot) \geq {}^i W_{\text{ССПИ}}^{\text{МЦА ЗД}} \end{array} \right\},$$

где  $k$  – номер шага итерационного процесса; (4 и 5) – условие согласования решения задач на  $i$ -м и  $i+1$ -м уровнях; (6) – условие сходимости при реализации согласованного оптимизационного поиска на  $i$ -м уровне;  $\Delta C^*$  и  $\Delta C^{**}$  – наперед заданные малые величины.

При комплексной замене двух подсистем (ЦСС и ССПИ) при согласованной оптимизации оцениваются условия согласования (4) и (5). Области допустимых решений  ${}^i G(\cdot)$  и  ${}^{i+1} G(\cdot)$  уточняются в процессе согласованного оптимизационного поиска.

#### 4 Результаты исследований

##### 1. Замена ЦСС в модуле МЦА (вариант 1)

В модуле МЦА устанавливается ЦСС с улучшенными техническими характеристиками. Это связано в основном с применением:

– современных высокоэффективных конструкционных материалов (композитные материалы и др.) для элементов конструкции корпуса и материалов

для оптических элементов (зеродур др.), а так же конструктивных решений, позволяющих применять новые более эффективные оптические схемы;

– высокоскоростных фотоприемников типа приборов с зарядовой связью (ПЗС) с временной задержкой с накоплением (ВЗН), фотоприемников большой размерности с малым размером элемента дискретизации (пикселя) и высокой чувствительностью.

В результате почти вдвое снижена масса ЦСС, а затраты на разработку и изготовление увеличились в 1,5 раза. Пространственное (геометрическое) разрешение улучшилось с 2 до 1,8 м. Результаты расчета точности оценки массы  $\Delta^i M_{\text{ЦСС}}$  и затрат  $\Delta^i C_{\text{ЦСС}}^1$  на изготовление 1-го базового образца ЦСС от номера итерации при согласовании решений задач ( $i$ ) и ( $i+1$ ) уровней управления разработкой приведены на рис. 3.

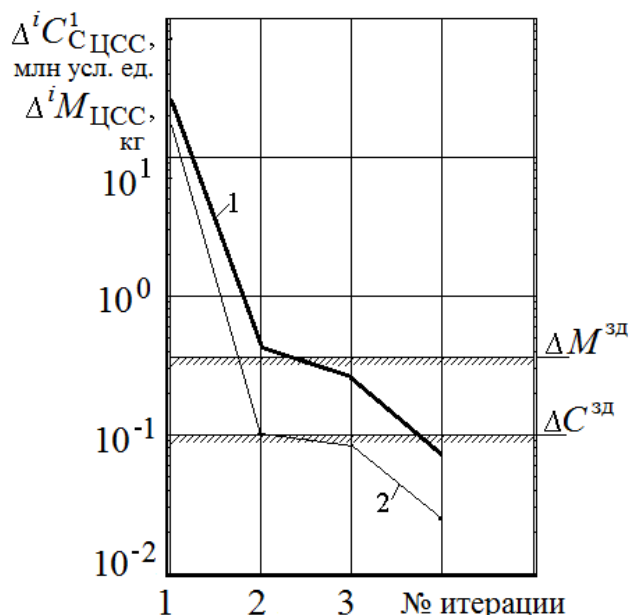


Рис. 3. Результаты расчета точности оценки массы  $\Delta^i M_{\text{ЦСС}}$  (1) и затрат  $\Delta^i C_{\text{ЦСС}}^1$  (2) на изготовление 1-го базового образца ЦСС от номера итерации



Результаты адаптации моделей массы  ${}^i M_{\text{ЦСС}}$  (в кг) и затрат на создание 1-го базового образца  ${}^i C_{\text{ЦСС}}^1$  (в млн усл. ед.) ЦСС на  $i$ -м уровне управления разработкой при двухуровневой согласованной оптимизации:

$${}^i M_{\text{ЦСС}} = 4,0128 \cdot 10^{-8} \cdot (a)^{-1,6557} \text{ при } 3,5295 \cdot 10^{-6} \leq a \leq 2,8877 \cdot 10^{-6};$$

$${}^i C_{\text{ЦСС}}^1 = 1,1065 \cdot {}^i M_{\text{ЦСС}}^{0,9883} \text{ при } 42,7 \leq {}^i M_{\text{ЦСС}} \leq 59,6,$$

где  $a$  – отношение пространственного разрешения ЦСС (в м) к наименьшему значению высоты полета КА (в м).

## 2. Комплексная замена подсистем в модуле МЦА (вариант 1)

Рассматривается вариант комплексной замены подсистем в модуле – кроме ЦСС проводится замена подсистемы ССПИ с улучшенными характеристиками (современные: элементная база, методы кодирования информации и др.), которая включает два основных блока: блок управления и считывания информации (БУСИ) и радиокomплекс передачи целевой информации (РКПИ). Применение РКПИ с улучшенными характеристиками и меньшей массы позволяет заменить 3 радиоканала с низкой пропускной способностью (36 Мбод каждый) на 1 канал (144 Мбод).

Результаты расчета точности оценки характеристик ЦСС и ССПИ (массы  $\Delta {}^i M_{\text{ЦСС}}$  и  $\Delta {}^i M_{\text{ССПИ}}$ , затрат на изготовление 1-го базового образца  $\Delta {}^i C_{\text{ЦСС}}^1$  и  $\Delta {}^i C_{\text{ССПИ}}^1$ ) от номера итерации при согласованном решении задач на ( $i$ ) и ( $i+1$ ) уровне управления разработкой при комплексной замене подсистем (ЦСС и ССПИ) приведены на рис. 4 а) и б).

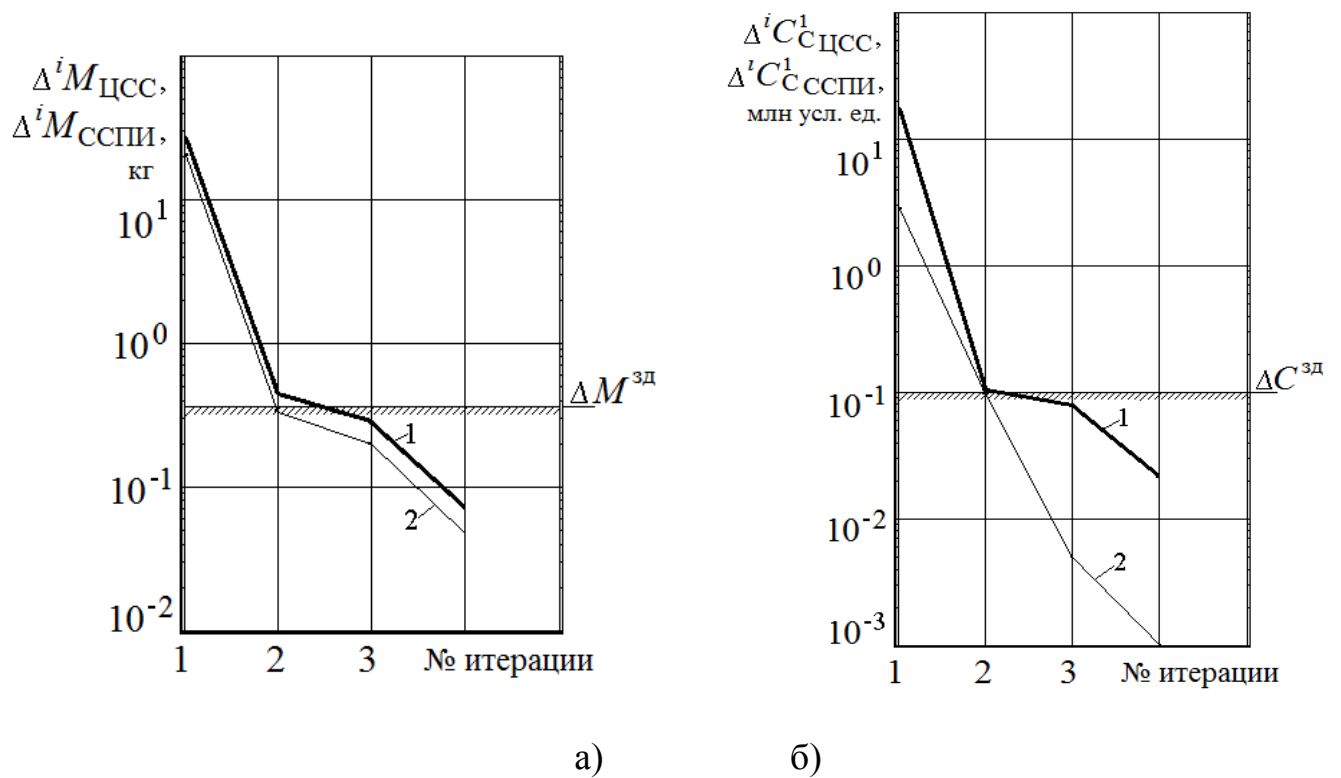


Рис. 4. Результаты расчета точности оценки характеристик подсистем МЦА при их комплексной замене от номера итерации: а) массы : 1 –  $\Delta^i M_{ЦСС}$ , 2 –  $\Delta^i M_{ССПИ}$ ; б) затрат на изготовление 1-го базового образца: 1 –  $\Delta^i C_{СЦСС}^1$ , 2 –  $\Delta^i C_{ССПИ}^1$

Результаты адаптации моделей масс  $^i M$  (в кг) и затрат на создание 1-го базового образца  $^i C_C^1$  (в млн усл. ед.) ЦСС и ССПИ на  $i$ -м уровне управления разработкой при 2-х уровневой согласованной оптимизации:

$$^i M_{ЦСС} = 4,0128 \cdot 10^{-8} \cdot (a)^{-1,6557} \text{ и } ^i M_{ССПИ} = 0,0226 \cdot (a)^{-0,5532}$$

$$\text{при } 3,5295 \cdot 10^{-6} \leq a \leq 2,8877 \cdot 10^{-6};$$

$$^i C_{СЦСС}^1 = 1,1065 \cdot ^i M_{ЦСС}^{0,9883} \text{ при } 42,7 \leq ^i M_{ЦСС} \leq 59,6;$$

$$^i C_{ССПИ}^1 = 1,6708 \cdot ^i M_{ССПИ}^{0,8359} \text{ при } 23,5 \leq ^i M_{ССПИ} \leq 26,2.$$

Результаты расчета технико-экономических характеристик базового модуля МЦА и его модификаций (№1 - замена ЦСС и №2 - замена ЦСС и ССПИ) приведены на рис. 5, характеристик подсистем модуля МЦА на рис. 6.

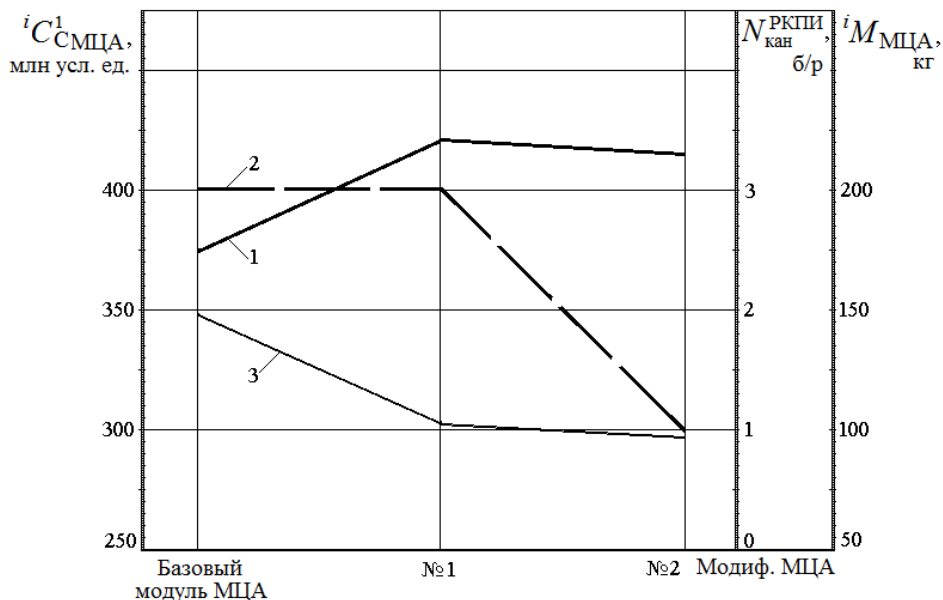


Рис. 5. Результаты расчета технико-экономических характеристик

модуля МЦА: 1 -  $iC^1_{СМЦА}$ ; 2 -  $N_{кан}^{РКПИ}$ ; 3 -  $iM_{МЦА}$ .

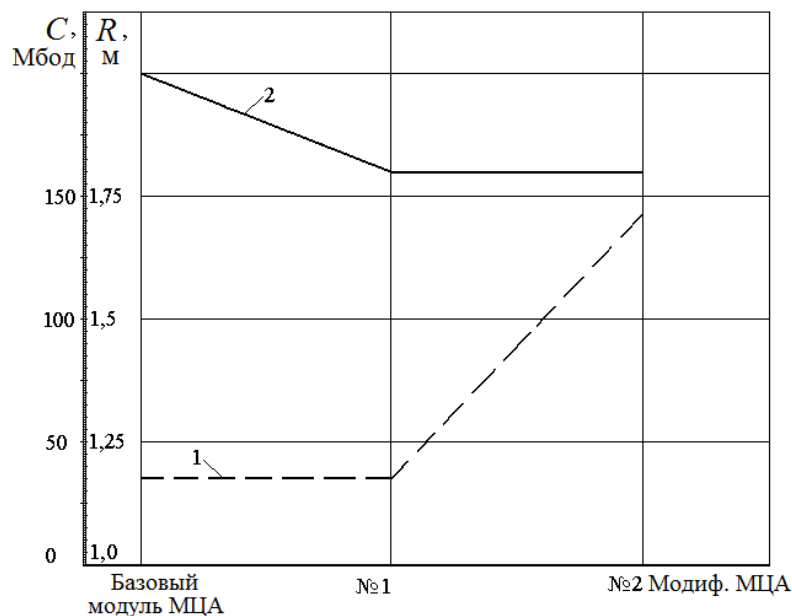


Рис. 6. Результаты расчета характеристик подсистем модуля МЦА: 1 - C; 2 - R.

Рассмотрим случаи, когда повышение эффективности модификации модуля МЦА достигаются за счет увеличения габаритно-массовых характеристик и использованием технологий, применяемых в разработках базового модуля.

### 3. Замена ЦСС в модуле МЦА (вариант 2)

Результаты расчета точности оценки массы  $\Delta^i M_{\text{ЦСС}}$  и затрат  $\Delta^i C_{\text{ЦСС}}^1$  на изготовление 1-го базового образца ЦСС от номера итерации при согласовании решений задач ( $i$ ) и ( $i+1$ ) уровней управления разработкой приведены на рис. 7.

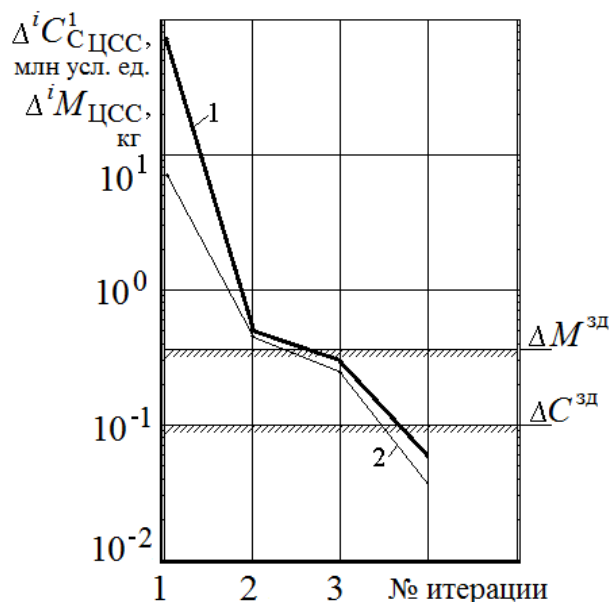


Рис. 7. Результаты расчета точности оценки массы  $\Delta^i M_{\text{ЦСС}}$  (1) и затрат  $\Delta^i C_{\text{ЦСС}}^1$  (2) на изготовление 1-го базового образца ЦСС от номера итерации

Результаты адаптации моделей массы  $^i M_{\text{ЦСС}}$  (в кг) и затрат на создание 1-го базового образца  $^i C_{\text{ЦСС}}^1$  (в млн усл. ед.) ЦСС на  $i$ -м уровне управления разработкой при двухуровневой согласованной оптимизации:

$$^i M_{\text{ЦСС}} = 9,9446 \cdot 10^{-9} \cdot (a)^{-1,8155} \text{ при } 3,3690 \cdot 10^{-6} \leq a \leq 3,0482 \cdot 10^{-6};$$

$$^i C_{\text{ЦСС}}^1 = 0,7388 \cdot ^i M_{\text{ЦСС}}^{0,8897} \text{ при } 85,7 \leq ^i M_{\text{ЦСС}} \leq 102,8.$$

#### 4. Комплексная замена подсистем в модуле МЦА (вариант 2)

Результаты расчета точности оценки характеристик ЦСС и ССПИ (массы  $\Delta^i M_{\text{ЦСС}}$  и  $\Delta^i M_{\text{ССПИ}}$ , затрат на изготовление 1-го базового образца  $\Delta^i C_{\text{ЦСС}}^1$  и  $\Delta^i C_{\text{ССПИ}}^1$ ) от номера итерации при согласованном решении задач на  $(i)$  и  $(i+1)$  уровне управления разработкой при комплексной замене подсистем (ЦСС и ССПИ) приведены на рис. 8 а) и б).

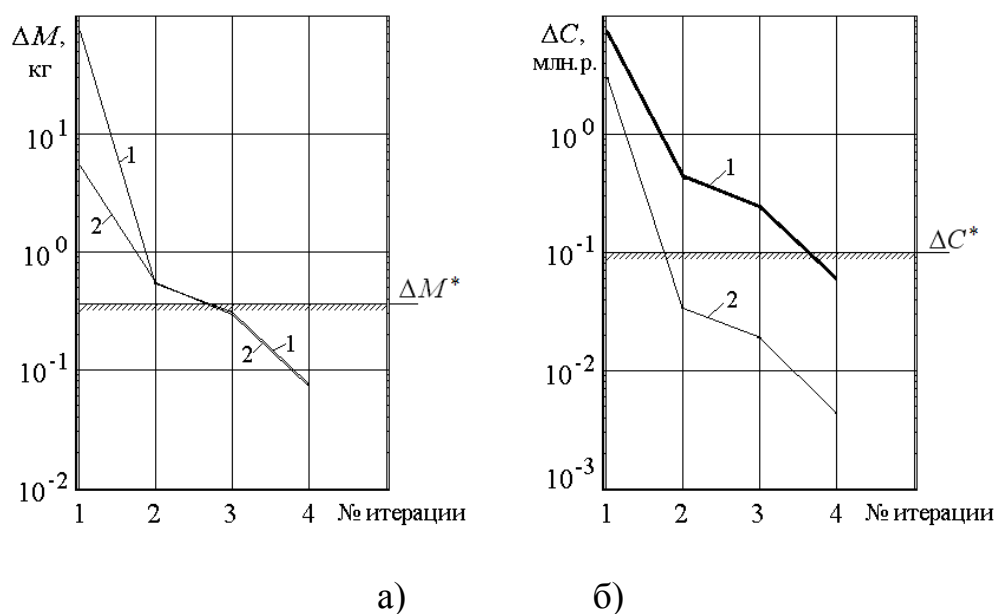


Рис. 8. Результаты расчета точности оценки характеристик подсистем МЦА при их

комплексной замене от номера итерации: а) массы : 1 –  $\Delta^i M_{\text{ЦСС}}$ , 2 –  $\Delta^i M_{\text{ССПИ}}$ ;

б) затрат на изготовление 1-го базового образца: 1 –  $\Delta^i C_{\text{ЦСС}}^1$ , 2 –  $\Delta^i C_{\text{ССПИ}}^1$

Результаты адаптации моделей масс  $^i M$  (в кг) и затрат на создание 1-го базового образца  $^i C_C^1$  (в млн усл. ед.) ЦСС и ССПИ на  $i$ -м уровне управления разработкой при двухуровневой согласованной оптимизации:

$$^i M_{\text{ЦСС}} = 9,9446 \cdot 10^{-8} \cdot (a)^{-1,8155} \text{ и } ^i M_{\text{ССПИ}} = 5,3740 \cdot (a)^{-0,8688}$$

$$\text{при } 3,3690 \cdot 10^{-6} \leq a \leq 3,0482 \cdot 10^{-6};$$

$${}^i C_{\text{ЦСС}}^1 = 0,7388 \cdot {}^i M_{\text{ЦСС}}^{0,8897} \text{ при } 85,7 \leq {}^i M_{\text{ЦСС}} \leq 102,8.$$

$${}^i C_{\text{ССПИ}}^1 = 1,5466 \cdot {}^i M_{\text{ЦСС}}^{0,8582} \text{ при } 29,3 \leq {}^i M_{\text{ССПИ}} \leq 34,9.$$

Результаты расчета технико-экономических характеристик базового модуля МЦА и его модификаций (№3 – при замене ЦСС и №4 – при замене ЦСС и ССПИ) приведены на рис. 9.

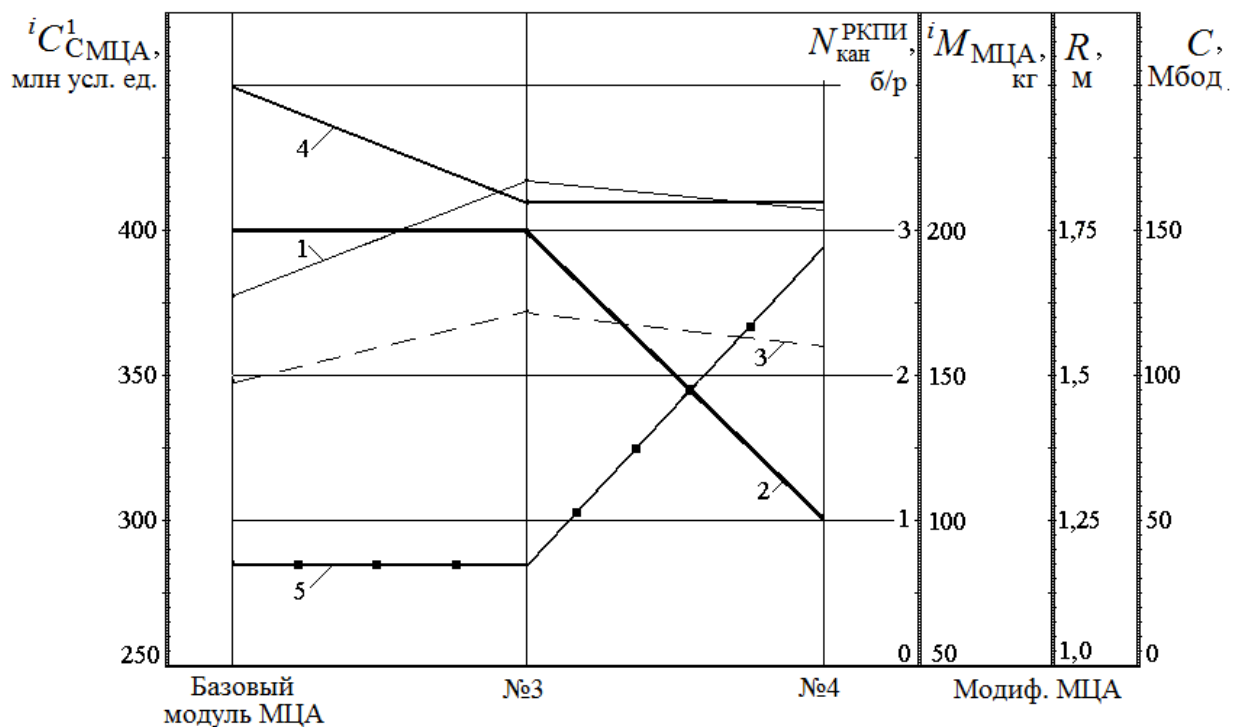


Рис. 9. Результаты расчета технико-экономических характеристик модификации КА:

$$1 - {}^i C_{\text{МЦА}}^1; 2 - N_{\text{кан}}^{\text{РКПИ}}; 3 - {}^i M_{\text{МЦА}}; 4 - R; 5 - C$$

### Выводы

Разработаны методические основы прогнозных исследований перспективных КА (модификаций КА) в составе космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при модернизации к заданному моменту времени. Для апробации разработанных методических основ прогнозных исследований, в

качестве примера, рассмотрена задача оптимизации параметров модификаций модуля МЦА в составе КА ДЗЗ при замене подсистем модуля с учетом требований к его надежности. Разработаны соотношения проектной модели  $i$ -го и  $i+1$ -го уровней управления разработкой. Рассматривается задача выбора параметров заменяемых подсистем модуля МЦА. Анализируются вопросы согласования проектных решений для модификаций модуля МЦА (верхний уровень управления разработкой) и для комплекса заменяемых подсистем (нижний уровень управления разработкой) при реализации метода двухуровневой согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей.

Проведены исследования направлений совершенствования эффективности модификаций МЦА в составе КА ДЗЗ при изменении требований к перспективным разработкам и прогнозный анализ влияния прогресса технологий реализации таких подсистем модуля МЦА, как ЦСС и ССПИ, так и модуля в целом. Полученные оценки технико-экономических характеристик модификаций модуля МЦА в составе КА ДЗЗ могут быть использованы для детального анализа эффективности существующих и перспективных аппаратов и их подсистем. Применение разработанных методических основ прогнозных исследований, включающего методики, алгоритмы и проектные модели, позволяет количественно оценить влияние требований к модификациям подсистем КА ДЗЗ и аппарата в целом.

### **Библиографический список**

1. Ламзин В.В., Матвеев Ю.А. Двухуровневая модель принятия проектных решений при разработке космической системы ДЗЗ и факторы неопределенности // Полет. 2012. № 1. С. 40–45.

2. Ламзин В.В. Исследование характеристик оптико-электронной космической системы дистанционного зондирования Земли при модернизации в планируемый период // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 46–55.
3. Ламзин В.В., Макаров Ю.Н., Матвеев Ю.А. Вопросы поиска эффективных проектных решений при модернизации космической системы ДЗЗ // Полет. 2011. № 5. С. 3–9.
4. Ламзин В.В., Макаров Ю.Н., Матвеев Ю.А. Ю.А. Мозжорин и вопросы технико-экономических исследований перспективных разработок космических систем // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 4 (61). С. 48–59.
5. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Оптимизация параметров космической системы дистанционного зондирования Земли с учётом особенностей проектно-конструкторских решений космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 6. С. 55–66.
6. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Проектный анализ космических систем ДЗЗ при наличии неопределенностей // Полет. 2011. № 6. С. 56–60.
7. Золотов А.А., Титов М.И. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
8. Четыркин Б.М. Статистические методы прогнозирования. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Статистика, 1975. – 200 с.