

УДК 629.78

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-508-519

Для цитирования: Методические принципы формирования ряда унифицированных космических платформ спутников связи / В. Е. Чеботарев, И. И. Зимин, А. А. Внуков, Е. А. Шангина // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3. С. 508–519. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-508-519.

For citation: Chebotarev V. E., Zimin I. I., Vnukov A. A., Shangina E. A. [Methodological principles for the formation of a number of unified space communication satellite platforms]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 508–519. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-508-519.

Методические принципы формирования ряда унифицированных космических платформ спутников связи

В. Е. Чеботарев^{1,2}, И. И. Зимин^{1*}, А. А. Внуков¹, Е. А. Шангина¹

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, Свободный, 79

*E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru

В данной статье сформулирована актуальная проблема формализации методических принципов поиска компромисса между повторяемостью и изменчивостью (новизной) свойств новых образцов космической техники – спутников связи. Основными методическими принципами преемственности развития является унификация изделий и их составных частей, средств технологического оснащения и технологических процессов, которая позволяет уменьшить их многообразие и номенклатуру. Упорядочение номенклатуры изделий и их составных частей достигается разработкой параметрических и типоразмерных рядов с рационально выбранными интервалами между соседними членами ряда по комплексному критерию, связывающему показатель целевой эффективности изделия с затратами на его создание. В данной работе разработана проектная модель и определены критерии выбора типоразмера универсальной космической платформы. При проектировании нового КА на основе унифицированной космической платформы возникает необходимость ее доработки для удовлетворения потребностей новой полезной нагрузки в ресурсах (по массе и энергопотреблению). В статье изложены методические принципы оценки диапазона эффективного применения универсальной космической платформы для двух крайних случаев потребностей в ресурсах (по массе и энергопотреблению) полезной нагрузки: ресурсы платформы избыточны или недостаточны. Разработаны методические принципы формирования ряда унифицированных космических платформ. Используя методические принципы формирования ряда унифицированных космических платформ, проведена оценка диапазонов эффективности УКП и оценка полноты ряда геостационарных спутников связи разработки АО «ИСС».

Ключевые слова: геостационарный спутник связи, космическая платформа, полезная нагрузка, методика оценки эффективности, унифицированный ряд.

Methodological principles for the formation of a number of unified space communication satellite platforms

V. E. Chebotarev^{1,2}, I. I. Zimin^{1*}, A. A. Vnukov¹, E. A. Shangina¹

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041

*E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru

This article formulates the topical problem of formalizing the methodological principles of the search for a compromise between repeatability and modification (novelty) of the properties of new models of space technology - communication satellites. The main methodological principles of continuity of development are the unification of products and their component parts, means of technological equipment and technological processes, which makes it possible to reduce their diversity and nomenclature. The order of the nomenclature of the articles and their component parts is achieved by the development of parametric and type-size series with rationally chosen intervals between the adjacent members of the series according to a complex criterion, a link to the target product performance with the cost of creating the product. The work developed a project model and defined criteria for selecting the size type of a universal space platform. In designing a new spacecraft on the basis of a unified space platform, there is a need to refine it to meet the resource requirements of the new payload (mass and energy consumption). The article sets out the methodological principles for assessing the range of effective applications of the universal space platform for the two most extreme cases of resource requirements (by mass and energy consumption) of the payload: the resources of the platform are excessive or insufficient. Methodological principles have been developed for the formation of a number of unified space platforms. Using the methodological principles for the formation of a series of unified space platforms, the effectiveness ranges of USP were evaluated and the completeness of a number of geostationary communication satellites of the development of «ISS» was assessed.

Keywords: Geostationary communications satellite, space platform, payload, performance evaluation method, unified series.

Введение

Создание изделий космической техники всегда осуществляется с использованием задела по техническим решениям и технологиям, т. е. повторяемость является неотъемлемым свойством нового изделия. В то же время от новизны изделия зависит его эффективность и конкурентоспособность. Поэтому при разработке изделий космической техники необходимо найти компромисс между повторяемостью и изменяемостью (новизной) их свойств, т. е. определить целесообразный уровень преемственности развития [1].

Основными методическими принципами преемственности развития является унификация изделий и их составных частей, средств технологического оснащения и технологических процессов, которая позволяет уменьшить их многообразие и номенклатуру. Упорядочение номенклатуры изделий и их составных частей достигается разработкой параметрических и типоразмерных рядов с рационально выбранными интервалами между соседними членами ряда по комплексному критерию, связывающему показатель целевой эффективности изделия с затратами на его создание. Эти методические принципы активно реализуются при создании космических аппаратов (КА) информационного обеспечения [2; 3].

Проектная модель целевой эффективности КА

При параметрическом анализе возможности размещения новой полезной нагрузки на унифицированной космической платформе (УКП) реализуется принцип максимального удовлетворения потребностей полезной нагрузки в ресурсах (масса, энергопотребление) КА в виде обобщенной массы полезной нагрузки $M_{\text{ПН.об}}$ [1–7]:

$$M_{\text{ПН.об}} = M_{\text{ПН}} + K_W \cdot W_{\text{ПН}} = M_{\text{ПН}} \cdot \alpha_{\text{ПН}}, \quad \alpha_{\text{ПН}} = 1 + K_W \frac{W_{\text{ПН}}}{M_{\text{ПН}}}, \quad (1)$$

$$K_{\text{ПН}} = \frac{M_{\text{ПН.об}}}{M_{\text{КА}}} = \alpha_M \cdot \alpha_{\text{ПН}}, \quad \alpha_M = \frac{M_{\text{ПН}}}{M_{\text{КА}}},$$

где $M_{\text{ПН}}$ и $W_{\text{ПН}}$ – масса и энергопотребление полезной нагрузки; $\alpha_{\text{ПН}}$ – коэффициент парциальных затрат ресурсов на обеспечение потребностей полезной нагрузки; K_W – средний коэффициент парциальных затрат массы КА на генерирование электроэнергии и сброса тепла, кг/Вт;

$K_{ПН}$ – удельный обобщенный коэффициент парциальных затрат ресурсов КА на решение целевой задачи; $M_{КА}$ – масса КА; α_m – коэффициент затрат массы КА на полезную нагрузку.

В этом случае обобщенная масса полезной нагрузки $M_{ПН.об}$ может использоваться в качестве показателя целевой эффективности КА [1; 3; 4].

Затраты на проведение опытно-конструкторских работ по разработке КА, согласно проектным методикам [1], в первом приближении считаются пропорциональными затратам на изготовление КА ($C_{изг}$):

$$C_{ОКР} = K_{ОКР} \cdot C_{изг} \cdot \quad (2)$$

Значение коэффициента $K_{ОКР}$ определяется новизной разрабатываемого КА и его составных частей, объемом наземной экспериментальной отработки КА и его составных частей (полезной нагрузки, космической платформы).

Затраты на изготовление КА, как совокупность затрат на изготовление его составных частей и их интеграцию в составе КА, зависят от его целевой эффективности, надежности, массы, энергопотребления и т. д. Учитывая тот факт, что масса КА $M_{КА}$ ограничена энергетическими возможностями ракеты-носителя и полностью используется для реализации целевых задач с заданной эффективностью и надежностью, при проектных исследованиях ее используют в качестве эквивалента стоимости изготовления КА [1; 3; 4]:

$$C_{изг} = C_{уд.и} \cdot M_{КА} \cdot \quad (3)$$

Значение удельного показателя $C_{уд.и}$ определяется на основании обработки статистических данных по КА-аналогам.

В результате получим функциональную зависимость стоимости затрат на проведение опытно-конструкторских работ КА по созданию от его массы:

$$C_{ОКР} = K_{ОКР} \cdot C_{уд.и} \cdot M_{КА} \cdot \quad (4)$$

Полученная система уравнений позволяет сформировать однокритериальную целевую функцию скалярного вида $\mathcal{E}_{КА}$, определяемый как отношение показателя целевой эффективности ($M_{ПН.об}$) к показателю финансовых затрат на создание КА ($C_{ОКР}$) [4; 8]

$$\mathcal{E}_{КА} = \frac{M_{ПН.об}}{C_{ОКР}} = \frac{M_{ПН.об}}{K_{ОКР} \cdot C_{уд.и} \cdot M_{КА}} \cdot \quad (5)$$

В случае создания нового КА на основе УКП базового КА (индекс «б» относится к базовому КА, а индекс «н» к новому) введем относительный (безразмерный) критерий (полагая одинаковыми значения $C_{уд.и}$) [4]

$$\delta \mathcal{E}_n = \frac{\mathcal{E}_{КА}^n}{\mathcal{E}_{КА}^b} = \frac{M_{ПН.об}^n M_{КА}^b K_{ОКР}^b}{M_{ПН.об}^b M_{КА}^n K_{ОКР}^n} \cdot \delta \mathcal{E}_n = \frac{K_{об}^n}{K_{нб}^n} \cdot \frac{1}{K_{\mathcal{E}}^n} \geq 1, \quad K_{об}^m \geq K_{нб}^n \cdot K_{\mathcal{E}}^n; \quad K_{\mathcal{E}}^n = \frac{K_{ОКР}^n}{K_{ОКР}^b} \cdot \quad (6)$$

С помощью сформированного критерия проведем оценку диапазона эффективного применения модифицированной УКП для нового КА для различных вариантов конструктивной реализации [9; 10].

Методика оценки диапазона эффективного применения УКП

При проектировании нового КА на основе УКП возникает необходимость ее доработки для удовлетворения потребностей новой ПН в ресурсах (по массе и энергопотреблению).

Для определения бюджета ресурсов нового КА в сравнении с базовым КА воспользуемся следующими уравнениями [3; 4]:

$$M_{КА}^H = M_{УКП}^6 + M_{ПН}^H + K_0 \cdot \delta M_{УКП}; \quad (7)$$

$$\delta M_{УКП} = \alpha_M^6 (M_{ПН}^H - M_{ПН}^6) + K_w^6 (W_{ПН}^H - W_{ПН}^6),$$

где $M_{УКП}^6$ – масса базовой платформы, $M_{ПН}^H$ и $W_{ПН}^6$ – масса и энергопотребление полезной нагрузки нового КА; K_0 – коэффициент глубины модернизации, $K_0 = 0 \div 1$.

После соответствующих преобразований получим следующее выражение для определения массы нового КА

$$M_{КА}^H = K_{нб}^H \cdot M_{КА}^6, \quad \delta M_n = \frac{M_{ПН}^H}{M_{ПН}^6} - 1, \quad \delta W_n = \frac{W_{ПН}^H}{W_{ПН}^6} - 1, \quad (8)$$

$$K_{нб}^H = 1 + \alpha_M^6 (1 + K_0 \cdot \alpha_M^6) \delta M_n + K_0 \cdot \alpha_M^6 (\alpha_{ПН}^6 - 1) \delta W_n.$$

Аналогичные преобразования проведем для определения относительного показателя обобщенных затрат ресурсов

$$K_{об}^H = \frac{M_{ПН.об}^H}{M_{ПН.об}^6} = \frac{1}{\alpha_{ПН}^6} \left[1 + \delta M_n + (\alpha_{ПН}^6 - 1)(1 + \delta W_n) \right] = 1 + \frac{1}{\alpha_{ПН}^6} \left[\delta M_n + (\alpha_{ПН}^6 - 1) \delta W_n \right]. \quad (9)$$

Подставляя полученные зависимости $K_{нб}^H$ и $K_{об}^H$ в неравенство (6), получим

$$\delta M_n \left[1 - K_{э}^H \cdot \alpha_M^6 \cdot \alpha_{ПН}^6 (1 + K_0 \alpha_M^6) \right] \geq \alpha_{ПН}^6 (K_{э}^H - 1) - \delta W_n (\alpha_{ПН}^6 - 1) (1 - K_0 \cdot K_{э}^H \cdot \alpha_M^6 \cdot \alpha_{ПН}^6). \quad (10)$$

С использованием предложенной проектной модели КА и выбранной однокритериальной целевой функции $\delta \mathcal{E}_n$ проведем оценку диапазонов эффективного применения базовой УКП для двух вариантов реализации полезной нагрузки.

Вариант 1: потребности ПН в ресурсах удовлетворяются УКП с избытком $\left(\frac{M_{ПН}^M}{M_{ПН}^6} \leq 1, \frac{W_{ПН}^M}{W_{ПН}^6} \leq 1 \right)$, т. е. доработки УКП минимальны (создание интерфейсов с ПН), поэтому полагаем

$$K_0 = 0, \quad \delta M_{ИР} = 1 - \frac{M_{ПН}^{ИР}}{M_{ПН}^6} = -\delta M_n, \quad \delta W_{ИР} = 1 - \frac{W_{ПН}^{ИР}}{W_{ПН}^6} = -\delta W_n.$$

Применение УКП базового КА с избыточным ресурсом (УКП-ИР) для ПН создает предпосылки для ускоренного создания КА с новой ПН, снижает финансовые затраты на его разработку ($K_{э}^{ИР} < 1$), однако одновременно снижает целевую эффективность КА ($\mathcal{E}_{КА}$).

С учетом вышеизложенного, уравнения (8)–(10) примут следующий вид:

$$K_{нб}^{ИР} = 1 - \alpha_M^6 \cdot \delta M_{ИР} \quad 0 \leq \delta M_{ИР} \leq 1 \quad 0 \leq \delta W_{ИР} \leq 1; \quad (11)$$

$$\alpha_{ПН}^6 \cdot K_{об}^{ИР} = \alpha_{ПН}^6 - \delta M_{ИР} - (\alpha_{ПН}^6 - 1) \delta W_{ИР}; \quad (12)$$

$$(1 - K_{э}^{ИР}) \alpha_{ПН}^6 - (\alpha_{ПН}^6 - 1) \delta W_{ИР} \geq \delta M_{ИР} (1 - K_{э}^{ИР} \cdot \alpha_M^6 \cdot \alpha_{ПН}^6). \quad (13)$$

Оценим диапазон изменения параметров $\delta M_{ИР}$ и $\delta W_{ИР}$, исследуя неравенство (13) по критерию $K_{э}^{ИР}$:

$$1) \delta W_{ИР} = 0, \quad \delta M_{ИР} \leq \frac{\alpha_{ПН}^6 (1 - K_{э}^{ИР})}{1 - K_{э}^{ИР} \cdot \alpha_M^6 \cdot \alpha_{ПН}^6} = \delta M_{ИР}^0. \quad (14)$$

$$\text{Полагая } \delta M_{ИР}^0 \leq 1, \text{ получим } K_{э}^{ИР} \geq \frac{\alpha_{ПН}^6 - 1}{\alpha_{ПН}^6 (1 - \alpha_M^6)} = K_{э.1}^{ИР}.$$

$$2) \delta M_{\text{ИР}} = 0, \quad \delta W_{\text{ИР}} \leq \frac{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (1 - K_{\text{Э}}^{\text{ИР}})}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1} = \delta W_{\text{ИР}}^0. \quad (15)$$

Полагая $\delta W_{\text{ИР}}^0 \leq 1$, получим $K_{\text{Э}}^{\text{ИР}} \geq \frac{1}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta}} = K_{\text{Э.2}}^{\text{ИР}}$.

Решая совместно уравнения (13)–(15), получим обобщенное выражение для диапазона изменения параметров

$$1 - \frac{\delta W_{\text{ИР}}}{\delta W_{\text{ИР}}^0} \geq \frac{\delta M_{\text{ИР}}}{\delta M_{\text{ИР.1}}^0}, \quad 0 \leq \delta W_{\text{ИР}} \leq 1, \quad 0 \leq \delta M_{\text{ИР}} \leq 1.$$

$$K_{\text{Э}}^{\text{ИР}} \leq \frac{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - \delta M_{\text{ИР}} - (\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1)\delta W_{\text{ИР}}}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (1 - \alpha_M^{\delta} \cdot \delta M_{\text{ИР}})}, \quad K_{\text{Э.2}}^{\text{ИР}} \leq K_{\text{Э.1}}^{\text{ИР}} \leq K_{\text{Э}}^{\text{ИР}} \leq 1. \quad (16)$$

Если перевести неравенство (13) в равенство (одностороннее ограничение) и подставить полученную зависимость $\delta W_{\text{ИР}}$ от $\delta M_{\text{ИР}}$ в уравнение (12), то получим формулы для оценки зависимости интегральных показателей только от $\delta M_{\text{ИР}} \leq \delta M_{\text{ИР}}^0$:

$$K_{\text{НБ}}^{\text{ИР}} = 1 - \alpha_M^{\delta} \cdot \delta M_{\text{ИР}}, \quad K_{\text{об}}^{\text{ИР}} = (1 - \alpha_M^{\delta} \cdot \delta M_{\text{ИР}}) K_{\text{Э}}^{\text{ИР}} = K_{\text{НБ}}^{\text{ИР}} \cdot K_{\text{Э}}^{\text{ИР}},$$

$$1 - \alpha_M^{\delta} \leq K_{\text{НБ}}^{\text{ИР}} < 1, 0, \quad 1 - \alpha_M^{\delta} \leq \frac{K_{\text{об}}^{\text{ИР}}}{K_{\text{Э}}^{\text{ИР}}} < 1, 0. \quad (17)$$

Вариант 2: для удовлетворения повышенных потребностей ПН в ресурсах требуется доработка УКП (УКП-М), поэтому полагаем $K_0 = 1$.

Применение УКП-М для ПН с увеличенным ресурсом создает предпосылки для увеличения целевой эффективности КА ($\text{Э}_{\text{КА}}$) с новой ПН, однако одновременно увеличивает финансовые затраты на его разработку ($K_{\text{Э}}^{\text{ИР}} > 1$).

В этом случае уравнения (8)–(10) примут следующий вид:

$$\delta M_M = \frac{M_{\text{ПН}}^{\text{М}}}{M_{\text{ПН}}^{\delta}} - 1, \quad \delta W_M = \frac{W_{\text{ПН}}^{\text{М}}}{W_{\text{ПН}}^{\delta}} - 1;$$

$$K_{\text{НБ}}^{\text{М}} = 1 + \alpha_M^{\delta} (1 + \alpha_M^{\delta}) \delta M_M + \alpha_M^{\delta} (\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1) \delta W_M \geq 1; \quad (18)$$

$$K_{\text{об}}^{\text{М}} = 1 + \frac{1}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta}} \left[\delta M_M + (\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1) \delta W_M \right] \geq 1; \quad (19)$$

$$\delta M_M \left[1 - K_{\text{Э}}^{\text{М}} \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta} \cdot (1 + \alpha_M^{\delta}) \right] \geq \alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (K_{\text{Э}}^{\text{М}} - 1) - \delta W_M (\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1) (1 - K_{\text{Э}}^{\text{М}} \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta}). \quad (20)$$

Анализ полученного неравенства (20) позволяет сформулировать следующую систему ограничений:

$$1) \delta W_M = 0, \quad \delta M_M \geq \frac{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (K_{\text{Э}}^{\text{М}} - 1)}{1 - K_{\text{Э}}^{\text{М}} \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (1 + \alpha_M^{\delta})} = \delta M_M^0. \quad (21)$$

Полагая $\delta M_M^0 \leq 1$, получим $K_{\text{Э}}^{\text{М}} \leq \frac{1 + \frac{1}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta}}}{1 + \alpha_M^{\delta} (1 + \alpha_M^{\delta})} = K_{\text{Э.1}}^{\text{М}}$;

$$2) \delta M_M = 0, \quad \delta W_M = \frac{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (K_{\text{Э}}^{\text{М}} - 1)}{(\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1) (1 - K_{\text{Э}}^{\text{М}} \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta})} = \delta W_M^0. \quad (22)$$

Полагая $\delta W_M^0 \leq 1$, получим $K_{\mathcal{E}}^M \leq \frac{2 - \frac{1}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta}}}{1 + \alpha_M^{\delta} (\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1)} = K_{\mathcal{E},2}^M$;

3) полагая в формуле (21) положительное значение знаменателя

$1 - K_{\mathcal{E}}^M \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta} \cdot (1 + \alpha_M^{\delta}) > 0$, получим ограничение $K_{\mathcal{E}}^M < \frac{1}{\alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (1 + \alpha_M^{\delta})} = K_{\mathcal{E},3}^M$.

Решая совместно уравнения (20)–(22), получим обобщенное выражение для диапазона изменения параметров

$$\frac{\delta M_M}{\delta M_M^0} \geq 1 - \frac{\delta W_M}{\delta W_M^0}, \quad 0 \leq \delta M_M \leq 1, \quad 0 \leq \delta W_M \leq 1, \quad 1 \leq K_{\mathcal{E}}^M < K_{\mathcal{E},1}^M < K_{\mathcal{E},2}^M < K_{\mathcal{E},3}^M. \quad (23)$$

Подставляя полученные ограничения в формулы (18), (19) определим двухстороннее ограничение на диапазон изменения интегральных показателей с учетом их взаимосвязи, согласно формуле (6),

$$1 + \alpha_M^{\delta} (\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1) \delta W_M^0 \leq K_{\text{НБ}}^M \leq 1 + \alpha_M^{\delta} (1 + \alpha_M^{\delta}) \delta M_M^0;$$

$$1 + \frac{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} - 1}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta}} \delta W_M^0 \leq K_{\text{об}}^M \leq 1 + \frac{\delta M_M^0}{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta}}. \quad (24)$$

Если перевести неравенство (20) в равенство (одностороннее ограничение) и подставить полученную зависимость δW_M от δM_M в уравнения (18) и (19), то получим формулы для оценки зависимости интегральных показателей только от δM_M

$$K_{\text{НБ}}^M = 1 + \alpha_M^{\delta} \frac{\alpha_{\text{ПН}}^{\delta} (K_{\mathcal{E}}^M - 1) + \delta M_M \cdot \alpha_M^{\delta}}{(1 - K_{\mathcal{E}}^M \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta})} \geq 1; \quad (25)$$

$$K_{\text{об}}^M = 1 + \frac{(K_{\mathcal{E}}^M - 1) + \delta M_M \cdot K_{\mathcal{E}}^M \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_M^{\delta}}{(1 - K_{\mathcal{E}}^M \cdot \alpha_M^{\delta} \cdot \alpha_{\text{ПН}}^{\delta})} \geq 1. \quad (26)$$

Полученные формулы для оценки диапазона эффективного применения модифицированной УКП для нового КА используем для разработки методических принципов формирования параметрического ряда базовых КА и базовых УКП.

Методические принципы формирования параметрического ряда базовых КА и УКП

Упорядочение номенклатуры изделий и их составных частей достигается разработкой параметрических и типоразмерных рядов с рационально выбранными интервалами между соседними членами ряда по комплексному критерию, связывающему показатель целевой эффективности изделия с затратами на его создание [1; 11; 12].

Параметрический ряд – это совокупность числовых значений главного параметра изделия. В типоразмерном ряде главным параметром является геометрическая размерность. На базе этих рядов создается ряд конструктивно-подобных (однотипных) исполнений изделий.

Процесс определения оптимального состава и структуры параметрического ряда включает последовательное решение трех задач:

- определение границ параметрического ряда, выделяющих диапазоны возможных изменений параметров изделий;
- установление закономерности построения рядов главного и соподчиненных параметров изделия с учетом выявленных границ;
- определение оптимального построения параметрического ряда по критерию «эффективность – затраты».

Разработка параметрического ряда, как правило, базируется на данных комплексного инженерного прогнозирования развития изделий, методов и средств производства и учитывает выявленные при этом основные тенденции их развития.

Оценка возможностей реализации параметрического ряда осуществляется с учетом достаточности технических и технологических решений, что позволяет сформировать стратегию реализации этого ряда.

Границы параметрического ряда не являются стабильными и могут изменяться в обе стороны при желательном сохранении закономерностей построения ряда.

Установление закономерностей построения параметрического ряда осуществляется на основе выбора номенклатуры главных параметров, которые слабо зависят от конструктивных особенностей и технологии изготовления изделия.

Применение этих методических принципов для формирования параметрического ряда КА информационного обеспечения (КАИО) рассмотрим с использованием методики оценки диапазона эффективного применения УКП. На базе УКП создается ряд конструктивно-подобных (однотипных) исполнений КА, поэтому типоразмерный ряд УКП позволяет на их основе создавать непрерывный ряд типоразмеров КА различного функционального значения, включая базовые КА, для которых разрабатывались эти УКП. В качестве главного параметра параметрического ряда КАИО предлагается принять массу базового КА и обобщенную массу полезной нагрузки.

Геометрическая модель параметрического ряда приведена на рис. 1, на котором показаны два базовых КА, масса которых удовлетворяет условию

$$M_{\text{МИР}} = M_{\text{КА}}^{\text{БИР}} - M_{\text{КА}}^{\text{БМ}} > 0. \tag{27}$$

Базовый КА с массой $M_{\text{КА}}^{\text{БИР}}$ и обобщенной массой полезной нагрузки $M_{\text{пн.об}}^{\text{БИР}}$ используется для создания на основе его УКП с избыточным ресурсом нового КА с характеристиками

$$M_{\text{КА}}^{\text{ИР}} = M_{\text{КА}}^{\text{БИР}} \cdot K_{\text{НБ}}^{\text{ИР}}, \quad M_{\text{пн.об}}^{\text{ИР}} = M_{\text{пн.об}}^{\text{БИР}} \cdot K_{\text{об}}^{\text{ИР}}. \tag{28}$$

Базовый КА с массой $M_{\text{КА}}^{\text{БМ}}$ и обобщенной массой полезной нагрузки $M_{\text{пн.об}}^{\text{БМ}}$ используется для создания на основе его УКП с недостаточным ресурсом нового КА с характеристиками

$$M_{\text{КА}}^{\text{М}} = M_{\text{КА}}^{\text{БМ}} \cdot K_{\text{НБ}}^{\text{М}}, \quad M_{\text{пн.об}}^{\text{М}} = M_{\text{пн.об}}^{\text{БМ}} \cdot K_{\text{об}}^{\text{М}}. \tag{29}$$

Величина запаса по массе между базовыми КА определяется из следующего уравнения:

$$M_u = M_{\text{КА}}^{\text{М}} - M_{\text{КА}}^{\text{ИР}} = M_{\text{КА}}^{\text{БМ}} \cdot K_{\text{НБ}}^{\text{М}} - M_{\text{КА}}^{\text{БИР}} \cdot K_{\text{НБ}}^{\text{ИР}}, \quad \delta M_u = \frac{M_{\text{КА}}^{\text{М}} - M_{\text{КА}}^{\text{ИР}}}{M_{\text{КА}}^{\text{БМ}} - M_{\text{КА}}^{\text{БИР}}} \cdot 100 \%. \tag{30}$$

Условие $M_u > 0$ и $\delta M_u > 0$ обеспечивает непрерывность ряда.

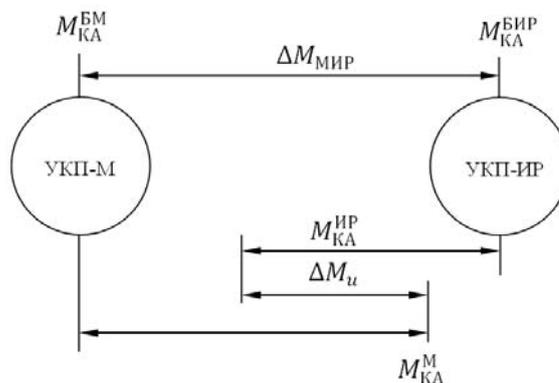


Рис. 1. Фрагмент параметрического ряда КА ИО с УКП:
 М – числовое значение главного параметра

Fig.1. Fragment of parameters series spacecraft

Величина запаса по обобщенной массе между базовыми КА определяется из следующего уравнения:

$$M_{об} = M_{пн.об}^M - M_{пн.об}^{ИР} = M_{пн.об}^{БМ} \cdot K_{об}^M - M_{пн.об}^{БИР} \cdot K_{пн.об}^{ИР},$$

$$\delta M_{об} = \frac{M_{пн.об}^M - M_{пн.об}^{ИР}}{M_{пн.об}^{БМ} - M_{пн.об}^{БИР}} \cdot 100 \% . \quad (31)$$

Условие $M_{об} > 0$ и $\delta M_{об} > 0$ обеспечивает непрерывность ряда.

Таким образом, использование в качестве главных параметров параметрического ряда КА информационного обеспечения (масса базового КА и обобщенная масса полезной нагрузки базового КА) позволяет сформировать двухпараметрический критерий непрерывности ряда по величине запаса по главным параметрам между соседними базовыми КА из ряда.

Эффективность разработанных методических принципов формирования ряда унифицированных космических платформ оценим для спутников связи, разработанных на основе базовых УКП «Экспресс – 1000» и УКП «Экспресс – 2000» [13–15].

Оценочные характеристики диапазона эффективности применения различных базовых УКП геостационарных спутников связи приведены в табл. 1.

При выборе значений относительного показателя затрат ($K_{Э}^H$) использовалась рекомендация из [1]: $K_{Э}^M = 1,1$, а $K_{Э}^{ИР} = 0,8$. Однако из-за наличия ограничений эти значения в ряде случаев уточнялись.

Таблица 1

Диапазон эффективности применения УКП геостационарных спутников связи

№ п/п		Луч-5А	Э-АТ2	Э-АТ1	Амос-5		
1	Тип УКП, номер ряда	Э-1000А (1)	Э-1000К (2)	Э1000НТВ (3)	Э-1000Н (4)	Э-2000В (5)	Э-2000А (6)
2	$M_{КА}$	1200	1350	1672	2100	2700	3550
3	$M_{ПН}$	550	250	329	670	1193	1300
4	$W_{ПН}$	1200	3000	5792	5880	10000	12100
5	$M_{ПН об}$	670	490	712	1175	1775	2004
6	α_M	0,458	0,185	0,197	0,319	0,442	0,366
7	$\alpha_{ПН}$	1,22	1,96	2,16	1,76	1,490	1,541
8	$K_{Э}^M$	1,05	1,1	1,1	1,05	1,015	1,05
9	δM_M^0	0,422	0,37	0,49	0,396	0,619	0,403
10	$K_{нб}^M$	1,28	1,08	1,116	1,166	1,395	1,202
11	$M_{КА}^M$	1536	1460	1866	2450	3766	4266
12	$K_{об}^M$	1,346	1,19	1,227	1,225	1,415	1,262
13	$M_{пн об}^M$	902	582	874	1439	2512	2528
14	$K_{Э}^{ИР}$	0,80	0,80	0,80	0,85	0,85	0,80
15	$\delta M_{ИР}^0$	0,44	0,55	0,653	0,504	0,510	0,562
16	$K_{нб}^{ИР}$	0,80	0,90	0,87	0,839	0,766	0,795
17	$M_{КА}^{ИР}$	957	1215	1459	1762	2094	2820
18	$K_{об}^{ИР}$	0,64	0,72	0,70	0,714	0,656	0,635
19	$M_{пн об}^{ИР}$	428	352	497	838	1167	1273

Полученный массив информации из табл. 1 использован для построения графиков оценки диапазонов эффективности УКП и оценки полноты ряда геостационарных спутников связи с УКП (рис. 2, табл. 2).

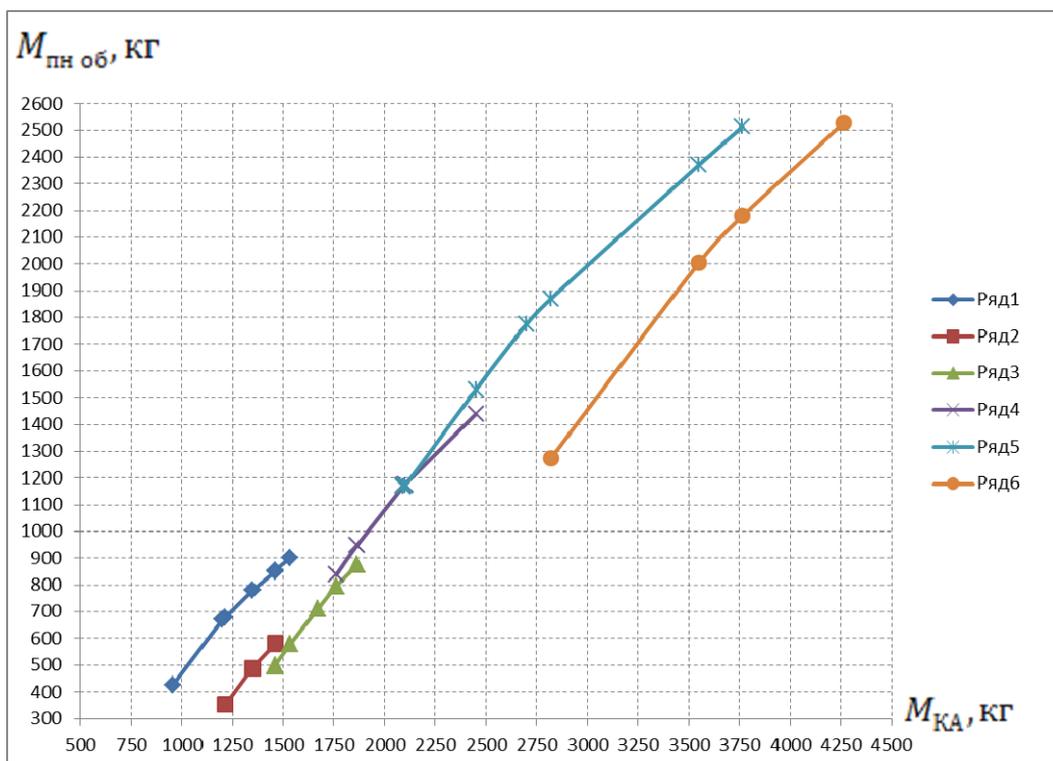


Рис. 2. Графики зависимости обобщенной массы ПН от массы КА для различных типоразмеров УКП и КА

Fig. 2. Curve dependence payload mass of spacecraft mass

Таблица 2

Характеристики ряда геостационарных спутников связи с УКП

№ П/П		Луч-5А	Э-АТ2	Э-АТ1	Амос-5		
1	Тип, дата	Э-1000А (2011)	Э-1000К (2014)	Э1000НТВ (2014)	Э-1000Н (2011)	Э-2000В	Э-2000А
2	$M_{КА}$	1200	1350	1672	2100	2700	3550
3	$M_{ПН}$	550	250	329	670	1193	1300
4	$W_{ПН}$	1200	3000	5792	5880	10000	12100
5	$M_{ПН об}$	670	490	712	1175	1775	2004
6	$K_{Э}^M$	1,05	1,1	1,1	1,05	1,015	1,05
7	$M_{КА}^M$	1536	1460	1866	2450	3766	4266
8	$M_{ПН об}^M$	902	582	874	1439	2512	2528
9	$K_{Э}^{np}$	0,80	0,80	0,80	0,85	0,85	0,80
10	$M_{КА}^{np}$	957	1215	1459	1762	2094	2820
11	$M_{ПН об}^{np}$	428	352	497	838	1167	1273
12	$M_{МИР}$		150	472	428	600	850
13	δM_u		214	16	24	59	111

Анализ представленной в табл. 2 информации позволяет выявить следующее:

- подтверждается полнота ряда геостационарных спутников связи разработки АО «ИСС»;
- диапазон эффективного применения УКП «Э-1000К перекрывается УКП-М «Э-1000А» и УКП-ИР «Э-1000НТВ».

Заключение

1. Сформулирована актуальная проблема формализации методических принципов поиска компромисса между повторяемостью и изменяемостью (новизной) свойств новых образцов космической техники – спутников связи.

2. Разработана проектная модель и определены критерии выбора типоразмера универсальной космической платформы.

3. Разработаны методические принципы оценки эффективности применения универсальной космической платформы, позволяющие оценить потребности в ресурсах (по массе и энергопотреблению) для полезной нагрузки в широком диапазоне значений.

4. Разработаны методические принципы формирования параметрического ряда базовых КА и УКП с использованием двухпараметрического критерия оценки полноты (непрерывности) ряда по величине запаса по главным параметрам (масса КА и обобщенная масса полезной нагрузки) между соседними базовыми КА из ряда.

5. Разработанные методические принципы формирования ряда унифицированных космических платформ позволили подтвердить полноту ряда геостационарных спутников связи разработки АО «ИСС».

Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. 488 с.

2. Анализ преемственности развития КА информационного обеспечения / В. Е. Косенко, В. В. Попов, В. Д. Звонарь, В. Е. Чеботарев // Актуальные вопросы проектирования АКА для фундаментальных и прикладных научных исследований. 2017. Вып. 2. С. 132–140.

3. Чеботарев В. Е., Зимин И. И. Методика оценки диапазона эффективного применения унифицированных космических платформ // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 3. С. 532–539.

4. Чеботарев В. Е., Зимин И. И., Внуков А. А. Исследование диапазона эффективного применения унифицированных космических платформ для геостационарных спутников связи // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5, № 1(35). С. 51–56.

5. Технология производства космических аппаратов / Н. А. Тестоедов, М. М. Михнев, А. Е. Михеев и др.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.

6. Anil K. Maini Varsha Agrawal. Satellite Technology: Principles and Applications. 2nd Edition / Anil K. Maini Varsha Agrawal. – A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 2011. 674 p.

7. Разработка систем космических аппаратов / под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка; пер. с англ. М.: Альпина Паблицер, 2015. 766 с.

8. Малышев В. В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010, 440 с.

9. Гуцин В. Н. Основы устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.

10. Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2010. 136 с.

11. Амиров Ю. Д. Основы конструирования. Творчество – стандартизация – экономика: справочник. М.: Издательство стандартов, 1991. 392 с.

12. Амиров Ю. Д. Стандартизация и проектирование технических систем. М.: Издательство стандартов. 1985. 312 с.

13. Пат. 2753003 Российская Федерация, МКПО 12-07. Модуль служебных систем космического аппарата / Похабов А. Ю., Марцинкевич Т. Н., Савцкий В. В. № 2020131543; заявл. 25.09.2020 ; опубл. 11.08.2021.

14. Пат. 034254 Евразийский патент, Космическая платформа / Жуль Н. С., Шаклеин П. А., Яковлев А. В. № 201700198; заявл. 31.03.2017 ; опубл. 22.01.2020.

15. Пат. 2648520 Российская Федерация, МКП 12-07. Космическая платформа / Жуль Н. С., Шаклеин П. А., Яковлев А. В. и др., № 2016119672 ; заявл. 20.05.2016 ; опубл. 26.03.2018.

References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing information support spacecrafts]. Krasnoyarsk, 2011, 488 p.

2. Kosenko V. E., Popov V. V., Zvonar V. D., Chebotarev V. E. [Analysis of development heritage concerning information support spacecraft]. *Analiz preemstvennosti razvitiya KA informatsionnogo obespecheniya*. 2017, Is. 2, P. 132–140 (In Russ.).

3. Chebotarev V. E., Zimin I. I. [Assessment methodology of the effective use range of the unified space platforms]. *Sibirskiy zhurnal nauki I tekhnologii*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 532–539 (In Russ.).

4. Chebotarev V. E., Zimin I. I., Vnukov A. A. [Study of the range of effective use of unified space platforms for geostationary communication satellites]. *Kosmicheskie apparaty I Tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 1 (35), P. 51–56 (In Russ.).

5. Testoedov N. A., Mikhnev M. M., Mikheev A. E. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft manufacturing technology]. 2009, Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosmich. un-t Publ., 352 p.

6. Anil K. Maini Varsha Agrawal. *Satellite Technology: Principles and Applications*. 2nd Edition / Anil K. Maini Varsha Agrawal. – A fohn Wiley and Sons, Ltd., Publication, 2011. 674p.

7. Foteskyu P., Suainerd G., Stark D. *Razrabotka system kosmicheskikh apparatov* [Development of spacecraft systems]. Moscow, Alpina Publ., 2015, 766 p.

8. Malyshev V. V. *Metody optimizatsii v zadachah sistemnogo analiza I upravleniya* [Methods of optimization in system analysis and control problems] 2010, Moscow, MAI Publ., 440 p.

9. Guschin V. N. *Osnovy ustroystva kosmicheskikh apparatov* [Foundation of satellites structure]. 2003, Moscow, Mashinostroenie Publ., 272 p.

10. Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Scheglov G. A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov* [Foundation of layout of spacecraft onboard equipment]. 2010, Moscow, Mosk. gos. tekhn. un-t Publ., 2010, 136 p.

11. Amirov Yu. D. *Osnovy konstruirovaniya. tvorchestvo-standartizatsiya-ekonomika* [Design basics. creativity-standardization-economics]. 1991, Izdatel'stvo standartov Publ., 392 p.

12. Amirov Yu. D. *Standartizatsia I proektirovanie Tekhnicheskikh Sistem* [Standardization and design of Technical Systems]. 1985, Izdatel'stvo standartov Publ., 312 p.

13. Pokhabov A. Y., Martsinkevich T. N, Savickiy V. V. *Modul sluzhebnykh system kosmicheskogo apparata* [Space platform]. Patent RF, No. 2753003, 2021.

14. Zhul N. S., Shaklein P. A., Yakovlev A. V. *Platforma kosmicheskaya* [Space platform]. Patent ЕАРО, No. 034254, 2020.

15. Zhul N. S., Shaklein P. A., Yakovlev A. V. *Platforma kosmicheskaya* [Space platform]. Patent RF, No. 2648520, 2018.

Чеботарев Виктор Евдокимович – доктор технических наук, доцент, ведущий инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: cheb1940@yandex.ru.

Зимин Иван Иванович – начальник сектора системных анализов и проектирования МКА; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru.

Внуков Алексей Анатольевич – начальник группы отдела баллистического и навигационного обеспечения КА; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: vnukov@iss-reshetnev.ru.

Шангина Екатерина Андреевна – кандидат технических наук, инженер-конструктор 2 категории отдела общего проектирования КА и систем; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: shangina@iss-reshetnev.ru.

Chebotarev Viktor Evdokimovich – Dr. Sc., docent, lead engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: cheb1940@yandex.ru.

Zimin Ivan Ivanovich – head of sector; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru.

Vnukov Aleksey Anatolievich – head of group; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: vnukov@iss-reshetnev.ru.

Shangina Ekaterina Andreevna – Cand. Sc., engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: shangina@iss-reshetnev.ru.
