

Д. С. Калиниченко, Є. Ю. Баранов, М. В. Полуян

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

## ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ВИБОРУ ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ

*Наводиться методика вибору проектних параметрів для авіаційно-космічної системи, призначеної для виведення мікро-спутників на низькі навколосемні орбіти. Методику призначено для аналізу засобів виведення, формування основних проектних параметрів, критеріїв ефективності та визначення раціональних проектних параметрів авіаційно-космічної системи.*

**Ключові слова:** авіаційно-космічна система, проектні параметри.

### ВСТУП

Останнім часом все частіше постає завдання зниження витрат на виведення корисного вантажу на навколосемну орбіту. Можливе вирішення даного питання полягає у повторному використанні компонентів системи виведення корисного вантажу, зменшення кількості засобів наземного обслуговування, а також скороченні районів падіння відокремлених частин. Нижче коротко наводиться методика визначення параметрів авіаційно-космічної системи (АКС), що здатна вирішити необхідні задачі (більш детально це питання вивчено в роботі [1]).

### МЕТОДОЛОГІЯ

Методика вибору проектних параметрів містить такі основні етапи:

- пошук та систематизація засобів виведення корисного вантажу;
- аналіз систематизації та вибір принципів параметрів авіаційно-космічної системи;
- вибір прототипу, його аналіз та вибір попередніх проектних параметрів;

- формування основних проектних параметрів АКС;
- формування критеріїв ефективності АКС;
- встановлення залежностей між основними проектними параметрами та показником ефективності;
- визначення раціональних значень основних проектних параметрів АКС, що забезпечують її максимальну ефективність.

Перша частина наведеної схеми дозволяє розглянути наявні засоби виведення корисного вантажу, провести їхній аналіз та визначити принципові параметри, що впливають на вигляд авіаційно-космічної системи. Детально вирішення питань першої частини методики розглянуто у роботі [2]. Друга частина методики дозволяє порівняти параметри відомих аналогів та прототипів із параметрами, необхідними для досягнення ефективності АКС у конкретному випадку.

### ФОРМУВАННЯ ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ

На початковому етапі вибір проектних параметрів доводиться проводити в умовах невизначеностей умов експлуатації та характеристик

багатьох бортових систем АКС. Тому слід обмежитися вибором проектних параметрів, що гарантують виконання льотно-технічних характеристик АКС. Льотно-технічні характеристики визначають шляхом вирішення рівнянь руху

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{P \cdot \cos(\alpha) - X}{m} - g \cdot \sin(\theta), \\ V \frac{d\theta}{dt} &= \frac{P \cdot \sin(\alpha) + Y}{m} - g \cdot \cos(\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $V$ ,  $t$  — швидкість і час польоту,  $P$  — сила тяги двигуна,  $\alpha$  — кут атаки,  $X$  — сила лобового опору,  $m$  — маса АКС,  $g$  — прискорення вільного падіння,  $\theta$  — кут тангажу,  $Y$  — підйомна сила.

З наведених рівнянь руху можна зауважити, що виконання льотно-технічних характеристик залежить від відношення сили тяги до маси АКС. Маса АКС залежить від кількості ступенів, відношення мас попереднього та наступного ступенів, а також питомого імпульсу. Таким чином, на виконання льотно-технічних характеристик АКС впливають такі проектні параметри:

- кількість ступенів та ступінь багаторазовості АКС;
- відносні маси ступенів та корисного вантажу;
- початкове перевантаження ступенів;
- питомий імпульс двигунів ступенів.

Аналіз кількості ступенів та ступеня багаторазовості показує, що використання авіаційно-космічних систем із багаторазовим першим ступенем та одноразовою ракетою космічного призначення для виведення мікросупутників на навколоземну орбіту є найбільш привабливим [2]. В такому випадку перший ступінь є безпілотним літальним апаратом (БПЛА), який виконує розгін корисного вантажу до оптимальних параметрів розділення. Параметри розділення визначаються таким чином, щоб надати наступному одноразовому ступеню якомога більші значення швидкості та висоти при помірних навантаженнях. Це не вимагатиме суттєвих доопрацювань першого ступеня при підготовці до наступного польоту. Для другого ступеня доцільно використовувати легкі ракети космічного призначення (РКП) масового виробництва. Аналогами таких систем можна вважати АКС «Пегас», RASCAL, «Мікроспейс».

Відносні маси ступенів можна розглянути на прикладах аналогічних АКС, наведених у таблиці.

На початкове перевантаження та питомий імпульс ступенів впливає тип двигуна та режим його роботи.

Для визначення найкращого співвідношення основних проектних параметрів використаємо критерії ефективності.

#### ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ

При формуванні критеріїв ефективності слід враховувати, що багаторазова авіаційно-космічна система створюється для виведення не одного, а багатьох однотипних космічних апаратів, рознесених у просторі та часі. Критерії ефективності авіаційно-космічної системи мають відображати суттєві якості, покращення яких при виведенні корисного вантажу дають суттєві переваги. Враховуючи призначення багаторазової авіаційно-космічної системи — виведення необхідної кількості корисних вантажів на навколоземні орбіти — основний показник критерію ефективності

Відносні маси ступенів аналогічних авіаційно-космічних систем

АКС	Відносна маса корисного вантажу $M_{кв}/M_0$ , %	Відносна маса ступенів
«Sänger» [3]	0.820	$M_2/M_0 = 0.306$
«Спіраль» [4]	0.435	$M_4/M_3 = 0.246$ $M_3/M_2 = 0.140$ $M_2/M_0 = 0.549$
RASCAL [6]	0.246	$M_3/M_2 = 0.206$ $M_2/M_0 = 0.158$
GT RASCAL [6]	0.296	$M_3/M_2 = 0.193$ $M_2/M_0 = 0.169$
«Мікроспейс»	0.133	$M_4/M_3 = 0.416$ $M_3/M_2 = 0.313$ $M_2/M_0 = 0.220$
L-1011+ «Pegasus XL» [7]	0.284	$M_4/M_3 = 0.236$ $M_3/M_2 = 0.257$ $M_2/M_0 = 0.141$
Ан-124-100+ Ракета-носії «Польот»	0.765	$M_3/M_2 = 0.333$ $M_2/M_0 = 0.176$

АКС можна сформувати у вигляді

$$E = \frac{B_p + B_3 n}{M_{\Sigma_{\text{КВ}}}}, \quad (2)$$

де  $B_p$  — витрати на розробку та експериментальне відпрацювання складових частин АКС, тобто разові витрати,  $B_3$  — витрати на один запуск,  $n$  — кількість запусків АКС,  $M_{\Sigma_{\text{КВ}}}$  — сумарна маса виведених корисних вантажів.

Обраний показчик ефективності поєднує витрати на розробку та експлуатацію АКС та показує, скільки необхідно здійснити запусків, щоб досягти зниження вартості виведення корисного вантажу до заданого показника.

### ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ ОСНОВНИМИ ПРОЕКТНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ПОКАЖЧИКОМ ЕФЕКТИВНОСТІ

Витрати  $B_p$  на проектно-конструкторську розробку та експериментальне відпрацювання залежать від ступеня новизни розробки, тобто кількості перейнятих компонентів із відомих систем, розмірності АКС та програми наземних і льотних випробувань. Витрати на розробку та відпрацювання відносять до разових витрат, що мають окупитися за час виконання космічної програми і не залежать від проектних параметрів напряму.

Витрати  $B_3$  на запуск включають: амортизаційні відрахування  $B_A$  на матеріальну частину багаторазових складових АКС, вартість  $B_O$  виготовлення одноразових складових АКС, вартість  $B_{\Pi}$  палива та витрачених матеріалів, вартість  $B_{pp}$  регламентних робіт та послуг аеродрому [5]:

$$B_3 = B_A + B_O + B_{\Pi} + B_{pp}. \quad (3)$$

Амортизаційні витрати  $B_A$  залежать від маси конструкції та систем багаторазових складових АКС. Залежність між амортизаційними витратами та проектними параметрами описується формулою

$$B_A = B_{\text{пит}}^A \frac{M_{\text{К}}^B}{n} = B_{\text{пит}}^A \frac{M_{\text{АКС}} \varepsilon_{\text{К}} R}{n} = B_{\text{пит}}^A \frac{M_{\text{АКС}} (1 - (1 - e^{-V/(gI)}) - \mu_{\text{КВ}}) R}{n}, \quad (4)$$

де  $B_{\text{пит}}^A$  — усереднені питомі витрати на амортизацію конструкції багаторазових складових АКС,

$M_{\text{К}}^B$  — маса конструкції багаторазових складових АКС,  $M_{\text{АКС}}$  — загальна маса АКС,  $\varepsilon_{\text{К}}$  — відносна маса конструкції АКС,  $R$  — ступінь багаторазовості АКС,  $R = M_{\text{К}}^B / M_{\text{АКС}} (1 - \mu_{\Pi} - \mu_{\text{КВ}})$ ,  $V$  — кінцева швидкість польоту АКС,  $I$  — питомий імпульс двигунів БПЛА,  $\mu_{\text{КВ}}$  — відносна маса корисного вантажу.

Вартість  $B_O$  виготовлення одноразових складових АКС залежить від маси конструкції та систем одноразових складових АКС. Залежність між вартістю виготовлення одноразових складових АКС та проектними параметрами описується формулою

$$B_O = B_{\text{пит}}^O M_{\text{К}}^O = B_{\text{пит}}^O M_{\text{АКС}} \varepsilon_{\text{К}} (1 - R) = B_{\text{пит}}^O M_{\text{АКС}} (1 - (1 - e^{-V/(gI)}) - \mu_{\text{КВ}}) (1 - R), \quad (5)$$

де  $B_{\text{пит}}^O$  — усереднена питома вартість виготовлення конструкції одноразових складових АКС.

Вартість  $B_{\Pi}$  палива залежить від маси палива АКС. Залежність між вартістю палива та питомим імпульсом описується формулою

$$B_{\Pi} = B_{\text{пит}}^{\Pi} M_{\text{АКС}} \mu_{\Pi} = B_{\text{пит}}^{\Pi} M_{\text{АКС}} (1 - e^{-V/(gI)}), \quad (6)$$

де  $B_{\text{пит}}^{\Pi}$  — питома вартість палива АКС,  $\mu_{\Pi}$  — відносна маса палива АКС.

Вартості  $B_{pp}$  регламентних робіт та послуг аеродрому напряму не залежать від проектних параметрів.

Сумарна маса  $M_{\Sigma_{\text{КВ}}}$  корисних вантажів — це сума мас вантажів, що мають бути виведені АКС за період дії космічної програми. Залежність сумарної маси корисних вантажів при умові виводу однотипних мікросупутників однакових мас від відносної маси корисного вантажу має вигляд

$$M_{\Sigma_{\text{КВ}}} = \sum_1^n M_{\text{КВ}} = \mu_{\text{КВ}} M_{\text{АКС}} n. \quad (7)$$

Таким чином, показчик ефективності набуде вигляду

$$E = \frac{B_p + \left( B_{\text{пит}}^A \frac{M_{\text{АКС}} \varepsilon_{\text{К}} R}{n} + B_{\text{пит}}^O M_{\text{АКС}} \varepsilon_{\text{К}} (1 - R) + M_{\text{АКС}} \mu_{\Pi} + B_{pp} \right) n}{\mu_{\text{КВ}} M_{\text{АКС}} n}, \quad (8)$$

$$V_{\text{КОЛ}} + \Delta V = I g \ln \left( \frac{1}{1 - \mu_{\Pi}} \right). \quad (9)$$

Для визначення раціональних значень основних проектних параметрів необхідно вирішити оптимізаційну задачу, приймаючи за цільову функцію показник ефективності (8) та обмежувачись виконанням льотно-технічних характеристик. У якості обмеження можна скористатись рівністю необхідної та наявної швидкостей, яка наведена у формулі (9).

## ВИСНОВКИ

1. Наведено методику вибору основних проектних параметрів авіаційно-космічної системи, яка дозволяє провести аналіз наявних засобів виведення, сформувані основні проектні параметри, критерії ефективності та визначити раціональні проектні параметри авіаційно-космічної системи.

2. Сформовано цільову функцію, яка відображає основні проектні параметри, що впливають на ефективність АКС.

3. Подальші дослідження слід спрямувати на вирішення оптимізаційної задачі та знаходження раціональних проектних параметрів АКС для заданих характеристик.

1. Калиниченко Д. С., Аксёненко А. В., Кашанов А. Э. и др. Методический подход к проектированию транспортно-космической системы // Авиационно-космическая техника и технология. — 2012. — № 4/91. — С. 27—32.
2. Калиниченко Д. С., Кашанов А. Э., Баранов Е. Ю. и др. Выбор проектных параметров авиационно-космической системы // Космич. техн. Ракетное вооружение. — 2014. — № 1. — С. 80—88.
3. Кобелев В. Н., Милованов А. Г. Средства выведения космических аппаратов. — М.: Рестарт, 2009. — 520 с.
4. Лукашевич В. П., Афанасьев И. Б. Космические крылья. — М.: ЛенТа Странствий, 2009. — 496 с.
5. Мишин В. П., Безвербий В. К., Панкратов Б. М. и др. Основы проектирования летательных аппаратов (Транспортные системы): Учеб. для техн. вузов. — М.: Машиностроение, 1985. — 360 с.
6. David A. Young Responsive Access Small Cargo Affordable Launch (RASCAL) independent performance evaluation // AE8900 Special Project Report. — Atlanta, Georgia 30332-0150, May, 2004.
7. Pegasus User's Guide. Release 5.0. — Orbital Sciences Corporation, 2000. — 103 p.

Стаття надійшла до редакції 09.09.15

## REFERENCES

1. Kalynychenko D. S., Axonenko A. V., Kashanov A. E., Poluian N. V., Tarasov V. E. The methodological approach to designing of space transportation system. Aerospace technic and technology, No. 4(91), 27—32 (2012) [in Russian].
2. Kalynychenko D. S., Kashanov A. E., Baranov E. Yu., et al. The choice of design parameters of aerospace systems. Kosmich. tehn. Raketnoe vooruzhenie, N 1, 80—88 (2014) [in Russian].
3. Kobelev V. N., Milovanov A. G. Launch vehicles of spacecrafts, 520 p. (Restart, Moscow, 2009) [in Russian].
4. Lukashovich V. P., Afanas'ev I. B. Kosmicheskie kryl'ja, 496 p. (LenTa Stranstvij, Moscow, 2009) [in Russian].
5. Mishin V. P., Bezverbyj V. K., Pankratov B. M., et al. Fundamentals of aircrafts design (Transportation Systems): Textbook for technical universities. 360 p. (Mashinostroenie, Moscow, 1985) [in Russian].
6. David A. Young Responsive Access Small Cargo Affordable Launch (RASCAL) independent performance evaluation. AE8900 Special Project Report. Atlanta, Georgia 30332-0150, May, 2004. (Atlanta, 2004).
7. Pegasus User's Guide. Release 5.0., 103 p. (Orbital Sciences Corporation, 2000).

Д. С. Калиниченко, Е. Ю. Баранов, Н. В. Полуян

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

## ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ВЫБОРА ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Приводится методика выбора проектных параметров для авиационно-космической системы, предназначенной для выведения микроспутников на низкие околоземные орбиты. Методика предназначена для проведения анализа наличных средств выведения, формирования основных проектных параметров, критериев эффективности и определения рациональных проектных параметров авиационно-космической системы.

**Ключевые слова:** авиационно-космическая система, проектные параметры.

D. S. Kalynychenko, Ye. Yu. Baranov, M. V. Poluian

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

## EFFICIENCY CRITERION TO SELECT DESIGN PARAMETERS OF THE AEROSPACE SYSTEM

We describe method of selection of design parameters for aerospace system, appointed for delivery of micro-satellites to Low-Earth Orbit. The method is developed for the analysis of existing launch vehicles, forming the base design parameters, performance criteria and determination of rational design parameters of aerospace system.

**Key words:** aerospace system, design parameters.