УДК 519. https://doi.org/10.15407/itm2024.02.066

О. М. САВОНІК

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ НОРМ НАДІЙНОСТІ КОСМІЧНОГО АПАРАТА З УРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і
Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: office.itm@nas.gov.ua

Метою роботи є розробка методу визначення оптимальних значень інтенсивностей відмов систем космічного апарата (КА) з урахуванням обмежень по масі КА на основі максимізації чистого доходу. У роботі прийнято, що системи КА є незалежними у сенсі надійності, кожна з них може перебувати лише у двох станах (працездатності або відмови) та кожен вид апаратури спеціального комплексу (СК) вносить незалежну частку в загальний ефект. Розглядається випадок, коли час до відмови систем КА розподілено за експоненційним законом. Використовується метод невизначених множників Лагранжа та методи чисельної оптимізації. Для розв'язання задачі застовуються залежності "маса – інтенсивність відмов" та "собівартість – інтенсивність відмов" для систем КА. Для забезпечуючого комплексу (ЗК) розмірність задачі математичного програмування скорочено до двох: виведено формулу, яка дозволяє на основі двох оптимальних інтенсивностей відмов систем ЗК знайти оптимальні інтенсивності відмов решти систем ЗК. Було проведено розділення змінних для ЗК та СК. Враховуючи незалежний внесок систем СК в загальний ефект, задачу для всього КА було зведено до системи двох рівнянь для ЗК і СК та $n_{сї}$ рівнянь від однієї змінної для СК з двома зв'язуючими змінними між ЗК та СК ($n_{сї}$ – кількість систем СК). Розроблено чисельно-аналітичний метод оптимізації інтенсивностей відмов систем КА, де початкове наближення визначається опосередковано – шляхом задання маси та ймовірністі безвідмовної роботи ЗК. Даний метод може бути корисним при розробці методології проєктування ракетно-космічної техніки з урахуванням економічних чинників. Після визначення оптимальних значень інтенсивностей відмов систем КА за залежностями "маса – інтенсивність відмов" та "собівартість – інтенсивність відмов" можна розрахувати значення мас систем КА та їх собівартостей, за якими знаходяться оптимальні значення параметрів і вартості відпрацювання систем. Застосування даного методу дозволить підвищити економічну ефективність та конкурентоздатність КА, що розроблюються.

Ключові слова: *оптимальні норми надійності, космічний апарат, дохід, витрати, проєктування.*

The goal of this paper is to develop a method for determining the values of system failure rates optimal in terms of net profit maximization with account for spacecraft mass limitations. It is adopted that the spacecraft systems are independent in terms of reliability, each of them can be only in two states (a functioning state or a failure state), and each equipment type of the special complex makes an independent contribution to the overall effect. The paper considers the case where the spacecraft system failure time obeys the exponential law. Use is made of the Lagrange multiplier method and numerical optimization methods. The problem is solved using the mass − failure rate and cost − failure rate relationships of the spacecraft systems. For the supporting complex, the dimension of the mathematical simulation problem is reduced to two: a formula is derived to find the optimal failure rates of all the systems of the supporting complex using the optimal failure rates of two systems of it. The variables for the special complex and the supporting complex are separated. Due to the fact that each special complex system makes an independent contribution to the overall effect, the problem for the whole spacecraft is reduced to a system of two equations for the special complex and the supporting complex and n_{cn} equations in one variable for the special complex with two coupling variables between the supporting complex and the special complex where n_{cn} is the number of the special complex systems. The paper presents a numerical-and-analytical method for spacecraft system failure rate optimization where the initial guess is specified indirectly: by specifying the supporting complex mass and probability of no-failure operation. The method may be used in the development of a space hardware design methodology accounting for economic factors. From the optimal values of the spacecraft system failure rates found using the mass – failure rate and cost – failure rate relationships, one can find the masses and costs of the spacecraft systems to be used in optimizing the parameters and development cost of the systems. The method is expected to increase the profitability and competitiveness of spacecraft under development.

Keywords: *optimal reliability norms, spacecraft, profit, cost, design.*

Вступ. В останні десятиліття однією з найактуальніших у ракетно-космічній техніці є проблема економічної ефективності. Її актуальність зумовлено передусім масштабною комерціалізацією космічної діяльності, коли в умовах конкурентної боротьби перевагу отримують ті компанії, чиї послуги, за незмінної якості та надійності, мають меншу вартість. Важливий також інший аспект проблеми: в умовах нестабільності економік навіть провідних світових держав постає питання про доцільність подальшого розвитку космонавтики як виду діяльності. Технологій нинішнього рівня цілком досить для задоволення основних космічних потреб людства, до того ж без залучення значних капіталів. В свою чергу, перспективні майбутні космічні проєкти внаслідок надзвичайної складності, а отже, і дуже високої вартості знаходяться під загрозою невиконання [1].

Методології проєктування з урахуванням економічних факторів присвячено чимало робіт (див., наприклад [2], [3], а також бібліографію в [4]).

Серед інших робіт можна відзначити наступні. У статті [5] відображено проблематику створення виробів ракетно-космічної техніки за критерієм мінімальної вартості. Розглянуто основні існуючі підходи до вирішення цього завдання. Обгрунтовано необхідність їх удосконалення. Для ефективного зниження вартості ракет-носіїв (РН) сформульовано нетрадиційний підхід до їх проєктування.

В основі цього підходу має лежати заміна домінуючого енергетичного критерію на багатокритеріальне проєктування, підпорядковане мінімізації вартості. Вартість при економічно ефективному проєктуванні повинна розглядатися як невід'ємна властивість виробу. При цьому доцільно підпорядкувати економічній ефективності не лише верхній рівень архітектури РН, але і її складові, аж до окремих агрегатів.

У роботі [6] наведено результати аналізу методології проєктування і розробки ракетно-космічних комплексів у міжнародній кооперації. Показано, що реалізація комплексом нової цільової функції — забезпечення комерційних запусків космічних апаратів (КА) — вимагає розширення функціональних можливостей ракетно-космічних комплексів (РКК) і, як наслідок, пов'язана з певними змінами в способах організації і послідовності проведення проєктних робіт. Відмічено особливості вирішення зовнішньої і внутрішньої задач, пов'язаних з вибором характеристик і технічною розробкою комплексу. Показано, що результати розв'язання зовнішньої задачі значною мірою впливають на вирішення внутрішньої. Викладені особливості вибору споживчих характеристик РКК, що визначають його конкурентоспроможність. Показано, що проєктування і розробка комплексу даного типу пов'язані з необхідністю певної модернізації методичного забезпечення.

Серія статей [4], [7 – 9] присвячена розробці методології проєктування ракет-носіїв та КА для умов державного фінансування: за критерієм чистого дисконтованого доходу [7], чистого доходу [4, 8], бюджетної ефективності [9].

Мета і задачі. Згідно з [8, 9] методологія проєктування КА за економічним критерієм складається з 5 етапів: аналіз задач галузей та вимог до апаратури для їх вирішення; вибір альтернативних варіантів мас КА шляхом попереднього оцінювання доходу з урахуванням даних про аналоги; проведення традиційного проєктування, побудова залежностей маси та вартості від надійності з точністю, потрібною при інженерному проєктуванні; визначення оцінок надійності систем, що доставляють максимум доходу при обмеженні на масу КА; визначення параметрів систем на основі оцінок надійності.

У цій статті розглядається четвертий етап. Метою роботи є розробка методу визначення оптимальних значень інтенсивностей відмов систем космічного апарата з урахуванням обмежень по масі КА на основі максимізації чистого доходу. При цьому потрібно отримати залежності між оптимальними значеннями для різних систем, які можна буде використовувати при проєктуванні КА з урахуванням економічних чинників, а також скоротити обсяг обчислень.

Математичне очікування величини прибутку КА, який розглядається як система тривалої дії [10], що складається з незалежних невідновлюваних підсистем, кожна з яких може перебувати лише у двох станах (працездатності або відмови), за умови, що кожен вид апаратури спеціального комплексу вносить незалежну частку в загальний ефект, має вигляд

$$\Pi\left(0,\mathrm{t}\right)=P_0(t)\sum_{i=1}^{n_{cn}}\left[r_i(t)\Phi_i(t)+\int_0^t f_i(x_i)\Phi_i(x_i)dx_i\right]-B-B_e\,, \quad (1)$$

де $\Pi\left(0,\mathrm{t}\right)$ – прибуток (чистий дохід) від експлуатації КА протягом часу t ; $P_0(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи забезпечуючого комплексу в інтервалі $[0,t]$; n_{cn} – кількість видів апаратури спеціального комплексу; $r_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи апаратури спеціального комплексу i-го виду; $\Phi_i(t)$ – величина доходу від апаратури спеціального комплексу i -го виду; $f_i(x_i)$ – щільність розподілу часу до відмови; $\Phi_i(x_i)$ – величина доходу від апаратури i-го виду за умови, що її відмова сталася в момент часу x_i ; B , B_e – собівартість та вартість експлуатації відповідно.

Дохід від i-го виду апаратури визначається за формулою [8, 9]

$$\Phi_i(x_i)=\gamma_i x_i ц_i\,\frac{\xi_0^i(e^{-\lambda_i t},ц_i,\varpi_i)}{\xi_0^i(e^{-\lambda_i t},ц_i,\varpi_i)+\sum_{j=1}^{N_{K_i}}\xi_j^i}\,, \quad (2)$$

де γ_i , x_i – продуктивність і час відмови апаратури i -го виду; $ц_i$ – середня за час t ціна продукції від розв’язання задачі i -го виду; $\varpi_i=\varpi_i\left(\lambda_i\right)$ – вектор параметрів апаратури i -го виду; N_{k_i} – кількість прогнозованих КА-конкурентів; ξ_0^i , ξ_j^i – показники конкурентоздатності КА, що розроблюється, та КА-конкурентів (функцію $\xi_0^i(e^{-\lambda_i t},ц_i,\varpi_i)$ прийнято по аналогії з [4], де вона дана для РН).

Склад критеріїв, що характеризують конкурентоздатність продукції апаратури спеціального комплексу, залежить від вимог замовника про вид продукції (інформаційні матеріали для подальшого опрацювання або готові результати вирішення господарських задач) і визначається на попередніх етапах проєктування.

Вважатимемо, що час до відмови систем КА розподілено за експоненційним законом:

$$P_i\left(t\right)=e^{-\lambda_i t}\;,\; i=\overline{1,n_{заб}+n_{cn}}\;. \quad (3)$$

Нехай отримано наступні залежності маси та вартости i -ї системи КА від інтенсивності відмов λ_i :

$$m_i=a_i+b_i\times\lg\left(1-e^{-\lambda_i t}\right),\; i=\overline{1,n_{заб}+n_{cn}}\;; \quad (4)$$

$$c_i = e_i + d_i \times \lg\left(1 - e^{-\lambda_i t}\right),\ i = \overline{1, n_{заб} + n_{сп}}\ . \qquad (5)$$

Задача нормування надійності полягає у тому, щоб знайти такі значення показників інтенсивностей відмов систем КА, які дають максимум критерію ефективності (1).

Підставляючи у (1) залежності (2) – (5), отримуємо наступну задачу:

$$П(0, t) = e^{-t \sum_{i=1}^{n_{заб}} \text{a}_i} \cdot \sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}} \left\{ e^{-\text{a}_i t} \text{¥}_i t ц_i \frac{\text{¶}_0^i(e^{-\text{a}_i t}, ц_i, \text{´})}{\text{¶}_0^i(e^{-\text{a}_i t}, ц_i, \text{´}) + \sum_{j=1}^{N_{K_i}} \text{¶}_j^i} + \right.$$

$$\left. + \text{¥}_i ц_i \frac{\text{¶}_0^i(e^{-\text{a}_i t}, ц_i, \text{´})}{\text{¶}_0^i(e^{-\text{a}_i t}, ц_i, \text{´}) + \sum_{j=1}^{N_{K_i}} \text{¶}_j^i} \times \left[e^{-\text{a}_i t} \left(-t - \frac{1}{\text{a}_i} \right) + \frac{1}{\text{a}_i} \right] \right\} - \qquad (6)$$

$$- \sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}} \left\{ e_i + d_i \cdot \ln\left(1 - e^{-\lambda_i t}\right) \right\} - B_e \to \max_{\lambda_i,\ i=\overline{1, n_{об}+n_{сп}}} .$$

При обмеженні на сумарну масу КА $G_{КА}$, визначену на попередньому етапі проєктування

$$\sum_{i=1}^{n_{заб}+n_{сп}} \left[a_i + b_i \lg\left(1 - e^{-\lambda_i t}\right) \right] = G_{КА} . \qquad (7)$$

Також враховуються обмеження з надійності

$$\varphi\left[\lambda_1, \ldots, \lambda_{n_{заб}+n_{сп}}\right] \geq R_{тр} , \qquad (8)$$

де $\varphi\left[\lambda_1, \ldots, \lambda_{n_{заб}+n_{сп}}\right] \geq R_{тр}$ – математична модель надійності КА; $R_{тр}$ – потрібне значення показника.

Після визначення з системи (6) – (8) оптимальних значень інтенсивностей відмов систем КА λ_i, за залежностями $m(p)$ и $c(p)$ визначаються значення мас систем m_i і собівартостей c_i, за якими знаходяться оптимальні значення параметрів і вартості відпрацювання систем.

Якщо отримані оптимальні значення надійностей систем забезпечуючого та спеціального комплексів істотно відрізняються від прийнятих (за аналогами) на першому етапі проєктування, то проводиться друга ітерація даного підходу визначення оптимальних параметрів.

Результати дослідження. Опишемо метод розв'язання задачі (6) – (8).

Для визначеності присвоюється номер 1 системі забезпечуючого комплексу, для якої виконується

$$\frac{d_i}{b_i} = \min_{j=\overline{1, n_{заб}}} \frac{d_j}{b_j} ;$$

номер $n_{заб}$ присвоюється системі забезпечуючого комплексу, для якої виконується

$$\frac{d_i}{b_i} = \max_{j=1, n_{заб}} \frac{d_j}{b_j}.$$

Спочатку враховуються тільки обмеження по масі. Скориставшись методом невизначених множників Лагранжа, отримаємо наступну функцію:

$$\Phi(0,t) = \Pi(0,t) - \Lambda\left[\sum_{i=1}^{n_{заб}+n_{сп}} \left\{a_i + b_i \cdot \ln\left(1-e^{-\lambda_i t}\right)\right\} - G_{KA}\right] \to \max_{\substack{\lambda_i,\, \Lambda \\ i=\overline{1,\, n_{заб}+n_{сп}}}}. \qquad (9)$$

Похідні від функції Лагранжа матимуть вигляд:

– по $\lambda_i,\ i = \overline{1, n_{заб}}$:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_i} = -t \cdot e^{-t\sum_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i} \left(\sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}} V_i\right) + \frac{d_i t e^{-\lambda_i t}}{1-e^{-\lambda_i t}} - \Lambda \frac{b_i t e^{-\lambda_i t}}{1-e^{-\lambda_i t}} = 0,\ i = \overline{1, n_{заб}}, \qquad (10)$$

$$V_i = ¥_i ц_i \frac{¶_0^i(e^{-а_i t}, ц_i, ´\ )}{¶_0^i(e^{-а_i t}, ц_i, ´\ ) + \sum_{j=1}^{N_{K_i}} ¶_j^i} * \frac{1-e^{-а_i t}}{а_i},\ i = \overline{n_{заб}+1, n_{заб}+n_{сп}}; \qquad (11)$$

– по $\lambda_i,\ i = \overline{n_{заб}+1, n_{заб}+n_{сп}}$:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_i} = e^{-t\sum_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i} \cdot \frac{dV_i}{d\lambda_i} + \frac{d_i t e^{-\lambda_i t}}{1-e^{-\lambda_i t}} - \Lambda \frac{b_i t e^{-\lambda_i t}}{1-e^{-\lambda_i t}} = 0,\ i = \overline{n_{заб}+1,\ n_{заб}+n_{сп}}, \qquad (12)$$

$$\frac{dV_i}{dа_i} = ¥_i ц_i \frac{\left(\sum_{l=1}^{N_{k_i}} ¶_l^i\right) \frac{d¶_0^i(e^{-а_i t}, ц_i, ´\ )}{dа_i}}{\left[¶_0^i(e^{-а_i t}, ц_i, ´\ ) + \sum_{l=1}^{N_{K_i}} ¶_l^i\right]^2} * \left(-te^{-а_i t}\right) * \frac{1-e^{-а_i t}}{а_i} +$$

$$+ ¥_i ц_i \frac{¶_0^i(e^{-а_i t}, ц_i, ´\ )}{¶_0^i(e^{-а_i t}, ц_i, ´\ ) + \sum_{l=1}^{N_{K_i}} ¶_l^i} \left\{\frac{t}{а_i} e^{-а_i t} - \frac{1-e^{-а_i t}}{а_i^2}\right\},\ i = \overline{n_{заб}+1,\ n_{заб}+n_{сп}}. \qquad (13)$$

Для i-ї системи забезпечуючого комплексу маємо з (10):

$$e^{-t\sum_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i} \left(\sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}} V_i\right) = \left(\Lambda b_i - d_i\right) \frac{e^{-\lambda_i t}}{1-e^{-\lambda_i t}};$$

$$\frac{1}{b_i}\left(e^{\lambda_i t}-1\right)e^{-t\sum_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i}\left(\sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}}V_i\right)+\frac{d_i}{b_i}=\Lambda\,. \quad (14)$$

Вираз, аналогічний останньому (з заміною індексу i на j), можна записати для j-ї системи забезпечуючого комплексу. Прирівнюючи ліві частини даних двох виразів та провівши перетворення, отримаємо (для визначеності покладемо $i=1$, $j=n_{заб}$):

$$e^{-t\sum_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i}\left(\sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}}V_i\right)=\frac{\frac{d_j}{b_j}-\frac{d_i}{b_i}}{\frac{e^{\lambda_i t}-1}{b_i}-\frac{e^{\lambda_j t}-1}{b_j}}=\frac{\frac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\frac{d_1}{b_1}}{\frac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}-\frac{e^{\lambda_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}}. \quad (15)$$

Формула (15) дозволяє виразити дохід від КА від двох змінних.

Аналогічний вираз (з однаковою лівою частиною) можна записати для k -ї та i -ї системи забезпечуючого комплексу. В результаті отримаємо

$$\frac{\frac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\frac{d_1}{b_1}}{\frac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}-\frac{e^{\lambda_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}}=\frac{\frac{d_k}{b_k}-\frac{d_1}{b_1}}{\frac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}-\frac{e^{\lambda_k t}-1}{b_k}}\,. \quad (16)$$

Звідси можна отримати

$$\lambda_k=\frac{1}{t}\ln\left(1+b_k\Delta_k\right),\; k=\overline{2,\,n_{заб}-1}\,, \quad (17)$$

$$\Delta_k=\frac{\frac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\frac{d_k}{b_k}}{\frac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\frac{d_1}{b_1}}\frac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}+\frac{\frac{d_k}{b_k}-\frac{d_1}{b_1}}{\frac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\frac{d_1}{b_1}}\frac{e^{\lambda_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}\,. \quad (18)$$

Перейдемо до спеціального комплексу. З формул (14) та (15) отримаємо:

$$\Lambda=\frac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}*\frac{\frac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\frac{d_1}{b_1}}{\frac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}-\frac{e^{\lambda_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}}+\frac{d_1}{b_1}\,. \quad (19)$$

З (12) отримаємо:

$$\frac{1}{t}*\frac{e^{a_i t}-1}{b_i}e^{-t\sum_{i=1}^{n_{заб}}a_i}\cdot\frac{dV_i}{da_i}+\frac{d_i}{b_i}=\Lambda,\qquad i=n_{заб}+1,\ldots,n_{заб}+n_{сп}\,.$$

Отже

$$\frac{1}{t}*\frac{e^{a_i t}-1}{b_i}\cdot\frac{dV_i}{d a_i}=e^{t\sum\limits_{i=1}^{n_{заб}} a_i}\left(\frac{e^{a_1 t}-1}{b_1}*\frac{\dfrac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\dfrac{d_1}{b_1}}{\dfrac{e^{a_1 t}-1}{b_1}-\dfrac{e^{a_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}}+\frac{d_1}{b_1}-\frac{d_i}{b_i}\right), \tag{20}$$

$$i=n_{заб}+1,\ldots,n_{заб}+n_{сп}.$$

Беручи до уваги формули (17), (18), можна сказати, що права частина формули (20) залежить тільки від змінних λ_1, $\lambda_{n_{çàá}}$.

Задача (9) звелася до $n_{сї}$ рівнянь (20), рівняння (7) та наступного рівняння

$$\sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}} V_i=e^{t\sum\limits_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i}\,\frac{\dfrac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\dfrac{d_1}{b_1}}{\dfrac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}-\dfrac{e^{\lambda_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}}, \tag{21}$$

отриманого з (15). Перенесемо у (7) складники, що належать до забезпечуючого комплексу, у праву частину. Таким чином, у всіх рівняннях – (20), (7) та (21) – маємо у лівій частині змінні λ_i, що належать до спеціального комплексу, у правій частині – змінні λ_1, $\lambda_{n_{çàá}}$, що належать до забезпечуючого комплексу.

Якщо задати для забезпечуючого комплексу масу $G_{заб}^{KA}$ та ймовірність безвідмовної роботи $P_{заб}$, то ми можемо знайти λ_1, $\lambda_{n_{çàá}}$ з системи рівнянь

$$\begin{cases}\lambda_1+\lambda_{n_{заб}}+\dfrac{1}{t}\sum\limits_{i=2}^{n_{заб}-1}\ln\left(1+b_i\Delta_i\right)=-\dfrac{1}{t}\ln P_{заб}, \\ b_1\ln\left(1-e^{-\lambda_1 t}\right)+b_{n_{заб}}\ln\left(1-e^{-\lambda_{n_{заб}} t}\right)+\sum\limits_{i=2}^{n_{заб}-1} b_i\ln\left(1-\dfrac{1}{1+b_i\Delta_i}\right)=G_{заб}^{KA}-\sum\limits_{i=1}^{n_{заб}} a_i.\end{cases} \tag{22}$$

Змінні $\lambda_i,\ i=\overline{n_{заб}+1, n_{заб}+n_{сп}}$ можна знайти, розв'язуючи рівняння (20), кожне з яких тепер буде рівнянням відносно однієї невідомої змінної $\lambda_i,\ n_{заб}+1\le i\le n_{заб}+n_{сп}$.

Але у нас ще залишилися рівняння (7) та (21), які теж повинні задовольнятися. Це еквівалентно наступній умові:

$$g\left(\lambda_1,\lambda_{n_{заб}}\right)=\left[\sum_{i=1}^{n_{заб}+n_{сп}}\left[a_i+b_i\lg\left(1-e^{-\lambda_i t}\right)\right]-G_{KA}\right]^2+$$

$$+\left[\sum_{i=n_{заб}+1}^{n_{заб}+n_{сп}} V_i-e^{t\sum\limits_{i=1}^{n_{заб}}\lambda_i}\,\frac{\dfrac{d_{n_{заб}}}{b_{n_{заб}}}-\dfrac{d_1}{b_1}}{\dfrac{e^{\lambda_1 t}-1}{b_1}-\dfrac{e^{\lambda_{n_{заб}} t}-1}{b_{n_{заб}}}}\right]^2=0.$$

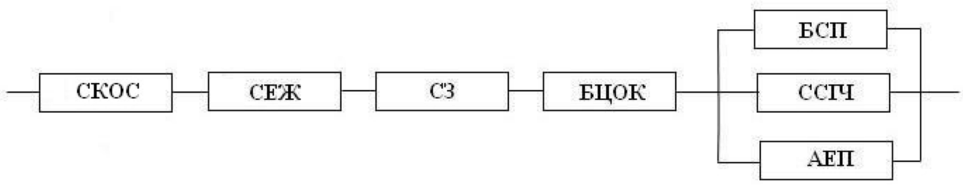
У підсумку задачу від $n_{заб} + n_{сп}$ змінних λ_i можна звести до наступної задачі:

$$g\left(\lambda_1, \lambda_{n_{заб}}\right) \to \min_{\lambda_1, \lambda_{n_{заб}}}, \qquad (23)$$

де значення решти змінних λ_i на кожному кроці чисельного алгоритму [11] знаходиться з (17) – (18) та (20). Початкове наближення можна знайти з (22), задавши попередньо значення $G_{заб}^{КА}$ та $P_{заб}$. Умова закінчення розрахунку – значення (23) повинне стати менше малого числа ε_1.

У разі, якщо не виконуються обмеження з надійності (8) (хоча це малоймовірно при максимальному доході, для отримання якого потрібна висока надійність), – використовується система (22) та обмеження (8) у формі рівності.

Приклад. Розглянемо КА дистанційного зондування Землі, структурну схему надійності якого подано на рис. 1 [12].



СКОС – системи керування, орієнтації та стабілізації; СЕЖ – система електроживлення; СЗ – система зв'язку; БЦОК – бортовий цифровий обчислювальний комплекс; БСП – багатозональний скануючий пристрій; ССІЧ – сканер середнього інфрачервоного діапазону; АЕП – апаратура електронної пошти.

Рис. 1 – Структурна схема надійності КА

При розрахунках використовувалися наступні дані:

– маса КА $G_{КА}$ =179 кг;

– коефіцієнти для залежностей маси та вартості i -ї системи КА від інтенсивності відмов λ_i (табл. 1, дані з останніх двох стовпчиків взято з [12]).

Таблиця 1 – Дані для систем забезпечуючого та спеціального комплексів

Система КА	a_i	b_i	c_i	d_i
СКОС	59	-3,1	0	-231,4
СЗ	11	-1,2	0	-106,4
СЕЖ	34	-2,2	0	-173
БЦОК	5,4	-3,4	0	-394
БСП	6,9	-1,7	0	-184,8
ССІЧ	7,8	-1,8	0	-162,8
АЕП	6,3	-0,8	0	-16

У статті [4] критерій конкурентоздатності ракети-носія розглядався у вигляді:

$$\xi(m_н, p, ц) = \omega_1(m_н) + \omega_2(p) + \omega_3(ц), \qquad (24)$$

де $m_н$ – маса корисного навантаження, т; p – надійність РН (ймовірність безвідмовної роботи при підготовці до пуску і в польоті); $ц$ – ціна пуску (млн.$); $\mu_i (i = \overline{1,3})$ – функції, що визначаються на основі опитування особи, що приймає рішення.

Показник конкурентоздатності i-го виду апаратури КА прийнято по аналогії з [4] (з урахуванням того, що конкурентоздатність апаратури не залежить від її маси):

$$\P_0^i(e^{-\text{ª}_i t}, ц_i, ´_i(\text{ª}_i)) = \P^i_{0\text{ª}_i}(\text{ª}_i) + \P^i_{0ц_i}(ц_i), \; i = \overline{1, n_{сп}} .$$

В якості функцій $\P^i_{0\text{ª}_i}(\text{ª}_i)$ і $\P^i_{0ц_i}(ц_i)$ використано логістичну криву [13], яка добре підходить для опису економічних процесів і дедалі більше практично застосовується економістами. Остаточний вираз показника конкурентоздатності i-го виду апаратури має вигляд:

$$\P_0^i(e^{-\text{ª}_i t}, ц_i, ´(\text{ª}_i)) = \frac{1}{1+e^{-y_1(\text{ª}_i)}} + \frac{1}{1+e^{-y_2(ц_i)}}, \; i = \overline{1, n_{сп}} ;$$
$$y_1(\text{ª}_i) = g_1 + g_2 \text{ª}_i ;$$
$$y_2(ц_i) = g_3 + g_4 ц_i .$$

Для розрахунків конкурентоздатності прийнято такі дані (табл. 2).

Таблиця 2 – Додаткові дані для систем спеціального комплексу

Система КА		БСП	ССІЧ	АЕП
$¥_i$		0,9	0,8	0,75
Ціна $ц_i$, у.о.		0,51	0,4	0,23
Сумарний показник конкурентоздатності КА-конкурентів		10	8	11
Коефіцієнти для обчислення логістичної кривої	g_1	5,6	17,5	5,98
	g_2	-5333333,3	-10000000	-9200000
	g_3	9,9	11,6	10
	g_4	-18	-29	-41,667

Результати розрахунків наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків

Система КА	Нормоване значення ймовірності безвідмовної роботи системи	Вартість системи, у.о.	Маса системи, кг
СКОС	0,952	704,5	68,3
СЗ	0,981	421,7	15,7
СЕЖ	0,966	583,6	41,4
БЦОК	0,948	1164,9	15,4
БСП	0,991	878,7	14,8
ССІЧ	0,953	499,6	13,2
АЕП	0,993	80,1	10,2

Вартість КА – 4333, 1 у.о. Прибуток – 768, 9 у.о.

Висновки. Розроблений метод дозволяє істотно скоротити обсяг обчислень при визначенні оптимальних значень інтенсивностей відмов систем КА з урахуванням обмежень по масі КА на основі максимізації чистого доходу, за умови, що кожен вид апаратури спеціального комплексу вносить незалежну частку в загальний ефект.

Доцільно дослідити можливість узагальнення отриманих результатів на випадок, коли залежності маси та вартості i -ї системи КА від інтенсивності відмов λ_i виду (4), (5) замінено на залежності “маса – надійність”, “вартість – маса” більш загального вигляду. Також становить інтерес можливість отримання подібних результатів для ракет-носіїв.

1. *Линник А. К., Балдин А. А.* Постановка задачи о стоимостной инженерии. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. 2013. Т. 15. С. 58–62.
2. *Мишин В. П., Безвербый В. К., Панкратов Б. М. и др*. / под ред. В. П. Мишина. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортные системы). Москва: Машиностроение, 1985. 360 с.
3. *Щеверов Д. Н.* Проектирование беспилотных летательных аппаратов. Москва: Машиностроение, 1974. 264 с.
4. *Мащенко А. Н., Федякин А. И.* Методологические аспекты проектирования ракеты-носителя по критерию экономической эффективности. Космічна наука і технологія. 2004. Т.10, № 2/3. С. 68–73. https://doi.org/10.15407/knit2004.02.068
5. *Линник А. К., Балдин А. А.* О проблеме создания ракет-носителей по критерию минимальной стоимости. Космическая техника. Ракетное вооружение. 2014. Вып. 2 (107). С. 50–54.
6. *Дегтярев А. В., Дегтярев М. А.* Методологические аспекты проектирования и разработки ракетно-космических комплексов в международной кооперации. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21, № 5. С. 7–17. https://doi.org/10.15407/knit2015.05.007
7. *Мащенко А. Н., Федякин А. И.* Основные этапы проектирования ракет-носителей по экономическому критерию. Техническая механика. 2001. № 2. С. 134–138.
8 *Мащенко А. Н., Федякин А. И.* Оптимизация параметров космического аппарата дистанционного зондирования Земли по критерию экономической эффективности. Космічна наука і технологія. 2004. Т. 10, № 5/6. С.167–170. https://doi.org/10.15407/knit2004.05.167
9. *Мащенко А. Н., Федякин А. И.* Выбор параметров изделий ракетно-космической техники в условиях глобальной конкуренции. Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 2 (43). С. 124–133.
10. Надежность технических систем: справочник / под ред. И. А. Ушакова. Москва: Радио и связь, 1985. 608 с.
11. *Пантелеев А. В., Летова Т. А.* Методы оптимизации в примерах и задачах. 2-е изд., исправл. Москва: Высшая школа, 2005. 544 с.
12. *Гладкий Э. Г., Абраменко Д. А., Кравченко А. А.* Нормирование надежности космического аппарата с учетом эффективности его функционирования. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. 2008. Том 8. С. 31–41.
13. *Колодізєва Т. О., Руденко Г. Р.* Інноваційні технології в логістиці: навчальний посібник. Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. 268 с.

Отримано 30.11.2023,
в остаточному варіанті 03.05.2024