

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ**

УДК 519.863:519.812 (045)

М.В. КУКЛІНСЬКИЙ

Національний авіаційний університет, м. Київ

**ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОКАЗНИКІВ ТА ЇХ АРГУМЕНТІВ В ЗАДАЧІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО СИНТЕЗУ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ**

**Анотація.** В статті розглядаються питання багатокритеріальної оптимізації авіаційно-космічної системи з позиції досконалості її масово-траєкторних параметрів та модифікацій. Вирішення цих питань, дасть змогу суттєво зменшити час проектування системи та фінансові витрати на її реалізацію.

**Ключові слова:** авіаційно-космічна система, масово-траєкторні параметри, багатокритеріальна оптимізація, економічна ефективність, вартість.

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы многокритериальной оптимизации авиационно-космической системы с позиции совершенства ее массово-траекторных параметров и модификаций. Решение этих вопросов, позволит существенно уменьшить время проектирования системы и финансовые затраты на ее реализацию.

**Ключевые слова:** авиационно-космическая система, массово-траекторные параметры, многокритериальная оптимизация, экономическая эффективность, стоимость.

**Annotation:** In the article the issues of multi-criteria optimization for aerospace system are considered from the standpoint of perfection its mass and trajectory parameters and modifications. Solution to these issues will allow significant minimization of time for system design and expenditures for its realization.

**Keywords:** aerospace system, mass and trajectory parameters, multi-criteria optimization, economic efficiency, costs.

**Вступ**

Сучасний рівень розвитку світової авіації та космонавтики свідчить про те, що даний напрямок діяльності є одним з найпріоритетніших. Його цільова складова набуває ключової ролі в забезпеченні супутникового спостереження, засобів зв'язку та передачі даних, космічної розвідки, прогнозування метеорологічних явищ та інше. Надалі значення космічних досліджень у вирішенні всього комплексу науково-дослідних, господарських, а також військових завдань тільки зростатиме.

Необхідність значного фінансування космічної галузі визначила досить вузьке коло світових держав, здатних розробляти і виробляти космічні апарати різного цільового призначення, а також засоби їх виведення на орбіту. Зважаючи на стратегічне значення, космічна галузь в цих державах оголошена національним пріоритетом.

Україна на сьогодні входить в перелік країн, що здатні створювати власні космічні багатоцільові проекти. Безумовно, одним з найважливіших завдань при цьому є забезпечення високого рівня конкурентоспроможності на світовому ринку. Проте успішне вирішення цієї задачі, насамперед, визначається правильно сформульованими цільовими показниками, для досягнення яких має бути розроблений відповідний науково-технічний підхід.

**Аналіз публікацій**

Аналіз публікацій [1, 2, 3, 4] довів, що вартість створення і експлуатації системи, яка використовує відповідні технології в інтересах країни, може досягти помітного економічного ефекту лише за умови використання авіаційно-космічних систем (АКС) як засобів доставки корисного вантажу на орбіти. Такі системи дадуть можливість:

- суттєво знизити питому вартість запуску до 900 – 1200 дол./кг, що набагато менше, ніж у одно-разових ракетноносіїв (РН);
- швидкого і оперативного розгортання супутникових угруповань;
- запуск системи з будь-якої широти;
- як часткове, так і повністю багаторазове використання системи;
- відсутність обов'язкової прив'язки до космодромів та ін.

Ці твердження вже підтверджує авіаційно-космічна система «Pegasus»/L-1011, яка на теперішній час експлуатується [5].

**Актуальність та постановка проблеми**

Серед найважливіших цільових завдань, які стоять перед розробниками і виробниками авіаційно-космічної техніки, є проблеми, які пов'язані з суттєвим скороченням часу розробки цієї техніки і зниженням її вартості. Від моменту початку розробки, коли закладаються найважливіші концептуальні характеристики авіаційно-космічної системи, до появи її в експлуатації проходить великий період часу (десятиріччя), протягом якого можуть істотно змінитися основні чинники, які спочатку висувалися до неї. Наприклад, величина попиту, значення потрібних льотно-технічних і економічних критеріїв та ін.

Україна володіє технічним і виробничим арсеналом для створення авіаційно-космічних систем в найкоротші терміни та з мінімальними витратами. Це обумовлено, перш за все, наявністю таких

транспортних літаків, як Ан-124 «Руслан» і Ан-225 «Мрія», які можуть бути використані в авіаційно-космічній системі як перші ступені, а також ракет різного класу, як засобів доставки корисного вантажу на орбіти.

Враховуючи значний прогрес в галузі обчислювальної техніки і математичного забезпечення, основним заходом щодо зниження вартості проектування і розробки авіаційно-космічних систем є впровадження методів автоматизованого проектування.

Застосування таких методів, які базуються на використанні відповідних математичних моделей, є актуальним науковим завданням, яке дозволить дослідити властивості системи з позицій досконалості компоновки, можливостей конструкції, льотних і експлуатаційних даних та масово-траєкторних параметрів (МТП) при різних варіантах її побудови.

#### **Мета і завдання дослідження**

Застосування та перехід до авіаційно-космічних систем, як до багаторазових, неминучий і об'єктивно обумовлений зовнішніми і внутрішніми причинами. До зовнішніх відносяться причини економічного та екологічного характеру, а також причини, які виникають при появі нових завдань покладених на АКС. До внутрішніх, перш за все, відносяться причини пов'язані із структурними змінами в космонавтиці. У будь-якому випадку розвиток АКС супроводжуватиметься постійною конкуренцією з одноразовими засобами вертикального старту. І цьому є просте пояснення – одноразові засоби більш дешеві, і в переважній більшості випадків, економічно ефективніші.

Хоч космічні засоби горизонтального старту мають ряд переваг, які ставлять їх попереду засобів які стартують вертикально, однак, вони поступаються останнім по вантажопідйомності і вимагають великих початкових капіталовкладень для свого створення. Тому опрацьовуючи різні концепції побудови авіаційно-космічних систем, насамперед, необхідно враховувати її економічну ефективність, як визначальний критерій, і ставити питання про необхідність проведення розрахунків його вартісних показників.

Тому метою даної роботи є знаходження таких вартісних показників визначальних критеріїв, які забезпечать мінімізацію витрат на розробку АКС за умови виконання поставленої на неї цільових програм.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

- побудова математичної моделі визначення області компромісів визначальних критеріїв системи;
- пошук відповідних масово-траєкторних параметрів критеріїв з урахуванням особливостей авіаційно-космічної системи;
- пошук раціонального варіанту побудови АКС шляхом оптимізації її визначальних критеріїв.

#### **Визначення основного показника економічної ефективності**

Аналіз робіт присвячених критеріальним дослідженням перспектив розвитку авіаційно-космічної техніки [6, 7, 8] показує, що оптимізація її основних тактико-технічних характеристик (ТТХ) розглядається в аспекті широко поширеної тріади критеріїв: ефективність ( $E$ ) – вартість ( $S$ ) – час ( $T$ ). Причому частіше в якості головного критерію цієї тріади використовується вартість (економічна ефективність), а два інших критерії виступають в якості обмежень. Це викликано завданням мінімізації ресурсів під час виведення корисного навантаження в космос і проведення різних операцій в космічному просторі.

Тому основним показником критерію економічної ефективності є вартість пуску (виведення) [9, 10]. Цей показник також має особливе значення при проведенні порівняння альтернативних варіантів побудови авіаційно-космічних систем, з метою виявлення їх економічних переваг. І саме цей показник прийнято розглядати для оцінки критерію економічної ефективності в критеріальних дослідженнях.

Аналіз існуючих методик розрахунку вартості пуску [9, 10, 11] показує, що для отримання об'єктивної оцінки, крім прямих витрат, які безпосередньо пов'язані з проведенням пуску (вартість матеріалів і палива, які витрачаються в кожному пуску; витрати на виробництво елементів, які використовуються одноразово; вартість амортизації багаторазових елементів, тощо) також повинні бути враховані витрати, пов'язані з підтримкою в робочому стані всіх систем забезпечення пуску, а також, з урахуванням ймовірнісної оцінки, вартість засобів, які втрачаються в аваріях.

Таким чином, виходячи з вищесказаного, сумарна вартість пуску включає такі складові:

- вартість виробництва одноразових елементів ( $S_{o,e}$ ) – ступенів ракетноносіїв, двигунів, зовнішніх паливних баків, розгінних блоків, буксирів та інших одноразових елементів;
- вартість амортизації багаторазових засобів ( $S_{am}$ ) – літаків-носіїв, орбітальних літаків, космічних апаратів, спеціальних цільових навантажень;

- вартість транспортування засобів виведення до місця старту як від заводу-виробника, що припадає на один пуск, так і від місця попередньої посадки ( $S_{mp}$ );
- вартість витратних матеріалів ( $S_{в.м}$ ) – компонентів палива, рідин і газів з урахуванням їх втрат на всіх етапах від транспортування із заводів до старту системи;
- віднесена до одного пуску вартість експлуатації ( $S_e$ ) багаторазових засобів виведення, наземного технічного комплексу всіх елементів системи в цілому, стартового і посадкового комплексу, наземного комплексу управління; вартість залучення літаків-заправників для АКС, пошуково-рятувальної служби; вартість відчуження землі під поля падіння ступенів ракетноносіїв; вартість екологічних заходів з очищення територій в місцях падіння залишків засобів виведення з невиробленими компонентами палива;
- вартість страховки засобів виведення і корисних вантажів від ймовірних втрат в аваріях, затримок запуску корисних вантажів або їх відмов у процесі виведення ( $S_{стп}$ );
- резерв на невраховані витрати ( $S_{рез}$ ) при підготовці та проведенні пуску.

Загальний вигляд вартості пуску виглядатиме:

$$S_{пуск} = S_{о.е} + S_{ам} + S_{mp} + S_{в.м} + S_e + S_{стп} + S_{рез} \cdot \quad (1)$$

Причому аналіз цих складових показав, що аргументами кожної із них є масово-траєкторні параметри системи.

### Постановка задачі оптимізації показника економічної ефективності АКС

Загалом авіаційно-космічну програму можна розділити на три основних етапи:

- науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (НДДКР), включаючи виготовлення дослідних зразків і льотні випробування;
- виробництво аерокосмічної техніки і необхідної інфраструктури;
- експлуатація парку та інфраструктури.

Виходячи з цих етапів можна побачити, що при розрахунку вартості пуску враховуються тільки другий і третій етапи, перший залишається без уваги. Крім цього, розглянутий вартісний показник враховує тільки повні витрати на створення та експлуатацію проектного зразка протягом заданого часу. Однак повний обсяг завдань може бути оцінений досить і досить наближено. Тому доцільно порівняльну оцінку економічної ефективності варіантів АКС здійснювати на тлі цілком конкретного обсягу розрахункових завдань (РЗ).

Так, наприклад, можна розробити такий номінальний варіант побудови АКС, який зміг би виконувати весь перелік розрахункових завдань. Очевидно, що він буде затребуваний довгі роки, але чи буде він по витраченим ресурсам задовольняти критерію економічної ефективності? А можна розробити варіант побудови АКС під конкретну розрахункову задачу, який, безсумнівно, буде задовольняти критерію економічної ефективності, проте чи буде він затребуваний надалі, в умовах постійно мінливих вимог до розрахункових завдань?

Тому необхідно знайти такий раціональний варіант побудови авіаційно-космічної системи, економічна ефективність якого з номінального розрахункового завдання оптимально задовольняла б конкретному варіанту розрахункового завдання. Схематично дана постановка задачі представлена на рис.1.

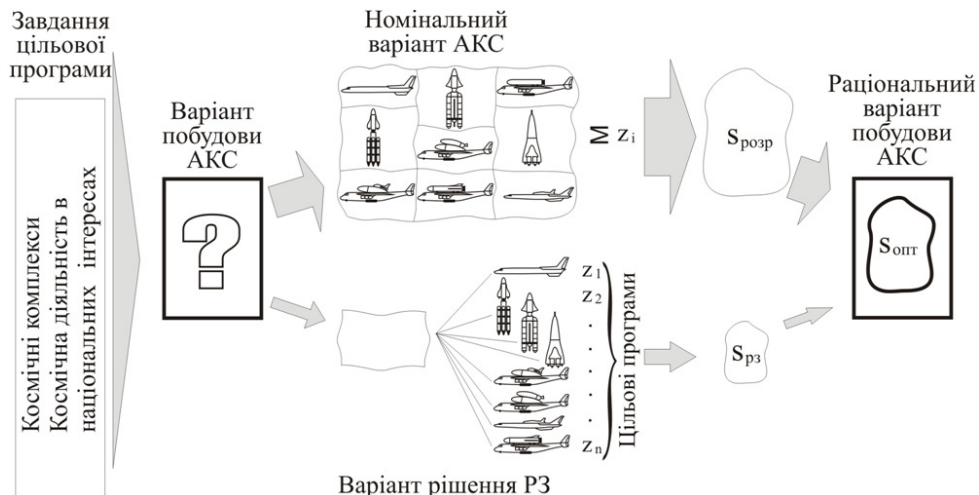


Рисунок 1 – Схематичне представлення постановки задачі

В даному випадку знаходження раціонального варіанту побудови авіаційно-космічної системи, означає обґрунтування значень її масово-траєкторних параметрів, яке виконується за допомогою оптимізації критерію економічної ефективності системи.

### Математична модель процесу обґрунтування основних критеріїв оптимізації

Як було зазначено вище, основним показником економічної ефективності АКС на сьогодні вважається вартість пуску ( $S_{пуск}$ ) (виведення) яка визначається сумою (1). Але беручи до уваги те, що цей показник враховує повні витрати, які можуть бути оцінені дуже наближено, його не можна розглядати як один цілісний показник, і відповідно застосовувати до нього методи однокритеріальної оптимізації.

Виходячи з постановки задачі оптимізації показника економічної ефективності АКС до розгляду пропонується не один показник ( $S_{пуск}$ ), а два показники які включають у себе поняття вартості: ( $S_{розр}$ ) – вартість розробки номінальної АКС і ( $S_{рз}$ ) – вартість АКС для вирішення конкретного розрахункового завдання. Розгляд саме цих двох показників дозволить надалі враховувати витрати на розробку, виготовлення дослідних зразків і льотні випробування АКС, а також дозволить робити порівняльну оцінку економічної ефективності варіантів АКС, які включають в себе повний обсяг завдань (номінальних варіантів) на тлі цілком конкретного обсягу РЗ.

Так як затрати на НДДКР вважаються пропорціональними вартості першого серійного зразка [12] то показник  $S_{розр}$  можна записати у вигляді:

$$S_{розр} = K_{НДДКР} S_1, \quad (2)$$

де  $K_{НДДКР}$  – коефіцієнт науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт;  $S_1$  – вартість першого серійного зразка.

Значення коефіцієнта НДДКР може бути призначено шляхом експертної оцінки, визначено шляхом перерахунку від конструкції-прототипу або за допомогою прямих економічних розрахунків.

Вартість першого зразка (в якій враховуються етапи науково-дослідних робіт, проектування, виготовлення дослідних зразків і їх випробування, розробка конструкторської документації, виготовлення матеріальної частини зразків) насамперед залежить від його складності і розмірності. Досліди показують, що від розмірності можна відволіктися, якщо за основу взяти питому вартість. Це дозволяє застосувати аналогово-порівняльний метод, на основі аналізу подібних виробів різної розмірності.

Статистичний аналіз питомих вартостей виготовлення типових виробів аерокосмічної техніки [12] показує, що цей параметр в середньому доволі сталий, тому помноживши питому вартість на суху масу виробів можна отримати вартість першого серійного зразка.

Так як значення ( $K_{НДДКР}$ ) і ( $S_1$ ) можуть бути різними для елементів однієї і тієї ж АКС виконаної в різних модифікаціях, то при розрахунку показника ( $S_{розр}$ ) необхідно враховувати всі особливості цих модифікацій.

Щодо розрахунку вартості рішення розрахункової задачі ( $S_{рз}$ ) то тут, насамперед, необхідно найбільш повно враховувати всі витрати. Вони повинні розглядатися з урахуванням складових, як безпосередньо пов'язаних з проведенням пуску, так і складових, які визначають підтримку всіх систем забезпечення пуску. Також повинні враховуватися вартість безповоротних втрат в процесі вирішення розрахункового завдання ( $S_{бв}$ ), і витрати на космічний апарат для вирішення поставленого розрахункового завдання ( $S_{ка}$ ).

Виходячи з вищесказаного в показник ( $S_{рз}$ ) будуть включатися всі доданки суми (1), з урахуванням ( $S_{бв}$ ) і ( $S_{ка}$ ), отже:

$$S_{рз} = S_{о.е} + S_{ам} + S_{тп} + S_{е.м} + S_e + S_{стп} + S_{рез} + S_{бв} + S_{ка}. \quad (3)$$

Тут ( $S_{бв}$ ) визначається за фактичними витратами пов'язаними зі зниженням потенційних можливостей АКС, наприклад, скороченням льотного ресурсу, витратами пов'язаними з коштами цільового призначення, які використовуються при вирішенні розрахункового завдання і т.д. Витрати ( $S_{ка}$ ) залежать від маси КА, від вартості виготовлення КА, від маси корисного вантажу, який виводиться

на орбіту, від параметрів орбіти виведення та сумарного числа пусків системи за весь період застосування АКС.

### Визначення основних аргументів критеріальних функцій

Як правило, всі необхідні вихідні дані, які використовуються в запропонованій методиці для пошуку ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ), є в проектах космічних систем, в статистичній інформації з експлуатації застосування аналогічних систем або можуть бути отримані розрахунковим шляхом із застосуванням методів економіко-математичного моделювання процесів створення і застосування систем даного класу. До того ж всі аргументи вартісних функцій є масово-траєкторними параметрами, які беруться з переліку основних тактико-технічних характеристик системи.

Проте застосування всіх МТП в критеріях ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ), привів би до невиправданого ускладнення критеріальних функцій, а також до надмірних труднощів вирішення завдань оптимізації. Тому природним є пошук найбільш інформативних МТП – координат критеріального простору, в якому буде здійснюватися екстремізація введених критеріїв.

З точки зору ефективного застосування, як частково, так і повністю багаторазових АКС, з усього переліку визначальних параметрів запропонованої вартісної моделі, до таких параметрів відносяться:

- $x_1$  – маса корисного вантажу, що виводиться на орбіту  $m_{кв}$ ;
- $x_2$  – сумарна маса одноразових елементів  $m_{\Sigma}^I$ ;
- $x_3$  – маса палива, що заправляється (з урахуванням дозаправки)  $m_{пал}$ ;
- $x_4$  – льотний ресурс системи  $R_{акс}$ ;
- $x_5$  – кут нахилу траєкторії у момент розділення ступенів ракето-носія  $\Theta_{рн}$ .

Для оцінки вартості можуть використовуватися і більш детальні моделі, однак це доцільно лише на останніх стадіях проектування.

Вибір саме цих МТП, насамперед, пояснюється основними вимогами які ставляться до математичних моделей оптимізації, а саме:

- всі вибрані МТП враховують можливість використання найбільш простих методів їх аналізу;
- всі вони можуть бути нормовані і виражені у вартісному вигляді;
- всі вони мають виражену область існування і для них однозначно можуть бути визначені обмеження;
- вони здатні забезпечити заданий рівень якості системи і ефективність виконання розв’язуваних нею завдань;
- всі вибрані МТП з достатньою повнотою і достовірністю характеризують АКС, а також дозволяють понизити розмірність розв’язуваної задачі, так як більшість параметрів, які визначають вартісну математичну модель, можуть бути однозначно визначені через запропонований набір МТП. Наприклад:
  - $m_{кв}$  та  $\Theta_{рн}$  визначають висоту орбіти, на яку виводиться КА;
  - $m_{пал}$  є сумою маси компонентів витрачених матеріалів і маси компонентів які заправляються з літака-заправщика, з урахуванням втрат на всіх етапах від заправки в літаку-заправщику до заправки в літаку-носії;
  - $m_{\Sigma}^I$  є сумарною масою всіх одноразових елементів;
  - через  $R_{акс}$  визначається період застосування засобів АКС і ресурс елементів системи в польотах, та інше. Решта визначальних параметрів моделі є або статистичними коефіцієнтами, або задаються експертно.
- якість системи може бути оцінена за сукупністю приватних критеріїв ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ), що представляють собою функції від обраних МТП:

$$\begin{aligned} S_{розр} &= S_{розр}(m_{кв}, m_{\Sigma}^I, m_{пал}, R_{акс}, \Theta_{рн}) \Rightarrow f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), \\ S_{рз} &= S_{рз}(m_{кв}, m_{\Sigma}^I, m_{пал}, R_{акс}, \Theta_{рн}) \Rightarrow f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5). \end{aligned} \quad (4)$$

Причому ці критерії знаходяться в тісному зв’язку і суперечності один з одним.

### Суперечливість критеріальних функцій

Так як авіаційно-космічна система розробляється для виконання широкого спектру розрахункових завдань, а реалізовується під конкретне завдання що входить в цей спектр (рис. 1), критерії ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ) не можна підсумовувати, а тому вони є суперечливі. Критерії ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ) можуть підсумовуватися лише у тому випадку, коли авіаційно-космічна система розробляється і реалізується тільки під один спектр розрахункових завдань (рис. 2). У решті випадків ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ) будуть суперечливими (рис. 3).

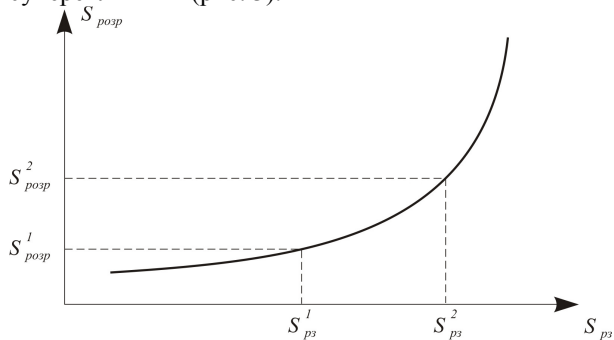


Рисунок 2 – Залежність  $S_{розр}$  від  $S_{рз}$  у разі несуперечливості (однокритеріальна задача)

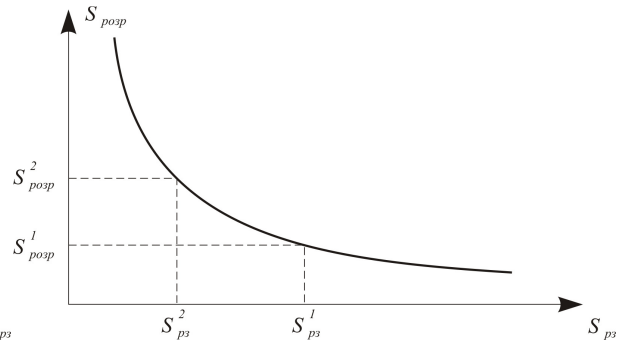


Рисунок 3 – Залежність  $S_{розр}$  від  $S_{рз}$  у разі суперечливості (багатокритеріальна задача)

Суперечливість критеріїв ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ) можна простежити ще й на прикладі того, що ( $S_{розр}$ ) буде зменшуватися з часом і удосконаленням системи в межах одного класу. Так як в кожний новий варіант реалізації АКС вже будуть включатися дані з попередніх варіантів, відповідно вартісні ресурси витратяться на них не будуть. І навпаки ( $S_{рз}$ ) буде збільшуватися з удосконаленням системи. Тому оптимізуючи систему в межах цих двох критеріїв одночасно, неможливо буде зменшити один, без збільшення іншого.

Також у разі суперечливості (рис. 3) спостерігається ще одна ситуація, в якій із зменшенням витрат на розробку, витрати на реалізацію ( $S_{рз}$ ) будуть збільшуватися.

Це не говорить про те, що спектр розв'язуваних розрахункових завдань збільшиться, витрати збільшаться у зв'язку з дефектами і поломками які виникатимуть при реалізації, і для усунення яких будуть витратитися додаткові кошти. Відповідно при збільшенні витрат на розробку ( $S_{розр}$ ) багатьох дефектів під час реалізації можна буде уникнути, за рахунок чого знизяться втрати ( $S_{рз}$ ). У цьому випадку можна говорити про більш «гнучкі» і функціональні варіанти побудови АКС, так як АКС може розроблятися під великий спектр вирішуваних завдань, а реалізовуватися під певну РЗ з цього спектра.

Враховуючи суперечливість критеріїв ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ) знаходження оптимального варіанта побудови АКС потребує застосування до них методів багатокритеріальної оптимізації. Необхідно також відзначити, що всі вищевикладені рекомендації та пояснення про несуперечливість і суперечливість критеріїв ( $S_{розр}$ ) і ( $S_{рз}$ ) та графічні пояснення до них відносяться і розглядаються на області оптимальних значень цих критеріїв.

### Висновок

Таким чином, можна сказати, що запропонований набір МТП визначає генеральну ідею створення АКС, яка може бути виражена через деякі критерії ефективності, визначені на множині цих МТП. Це дозволяє сформулювати парето-оптимальну множину варіантів побудови системи [13].

Запропонований підхід обґрунтування масово-траєкторних параметрів авіаційно-космічної системи також дозволяє сформулювати рекомендації при проектуванні і розробці авіаційно-космічних систем, оцінка якості яких відбувається по декількох критеріях.

Використання інформації про відносну важливість критеріїв [14] з запропонованим підходом дозволяє звузити область рішень, що шукаються, у декілька разів, а це дає можливість істотно мінімізувати витрати на розробку та доведення системи з урахуванням її цільових програм.

### Література

1. Авдуевский В. С. Народнохозяйственные и научные космические комплексы / В. С. Авдуевский, Г. Р. Успенский. – М. : Машиностроение, 1985. – 416 с.

2. Ануреев И. И. Ракеты многократного использования / И. И. Ануреев. – М. : Воениздат, 1975. – 214 с.
3. Гуцин В. Н. Основы устройства космических аппаратов : учебник для вузов / В. Н. Гуцин. – М. : Машиностроение, 2003. – 272 с.
4. Дмитриев В. Г. Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники / В. Г. Дмитриев. – М. : Физматлит, 2005. – 648 с.
5. Pegasus User's Guide : Release 4.0 / Orbital Sciences Corporation, 1998. – 175 с.
6. Лебедев А. А. Основы синтеза систем летательных аппаратов : учебное пособие для студентов вузов / [Лебедев А. А., Баранов В. Н., Бобронников В. Т. и др.] ; под ред. А. А. Лебедева. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
7. Проектирование самолетов / [Егер С. М., Мишин В. Ф., Лисейцев Н. К. и др.] ; под ред. С. М. Егера. – [3-е изд.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 616 с.
8. Егер С. М. Основы автоматизированного проектирования самолетов : учебное пособие для студентов авиационных специальностей вузов / С. М. Егер, Н. К. Лисейцев, О. С. Самойлович. – М. : Машиностроение, 1986. – 232 с.
9. Методика оценки и анализ стоимости пуска и стоимости транспортно-технического обслуживания производства в космосе / НИИ Экономики, 1990.
10. Методическая схема исследования технико-экономической эффективности одноразовых и многоразовых средств выведения / ВИМИ, 1991.
11. Отчет о научно-исследовательской работе «Технико-экономические исследования в обоснование создания авиационно-космической системы» : Методика оценки стоимости пуска (этап 02) / НИР «Вега-91», 1991.
12. Модель TRANSCOST для оценки стоимости ракеты-носителя и ее применение для анализа будущих систем : Экспресс-информация ВИНТИ // Астронавтика и ракетодинамика. – 1986. – № 12.
13. Куклинский М. В. Формирование парето-оптимального множества вариантов построения сложной технической системы / Максим Куклинский // Научно-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ». – 2013. – №3 (27). С. 59–63.
14. Куклінський М. В. Проблеми звуження парето-оптимальної множини варіантів побудови авіаційно-космічної системи / Максим Куклінський // Збірник наукових праць «Проблеми інформатизації та управління». – 2013. – № 2 (42). С. 56–60.

#### Відомості про авторів

**Куклінський Максим Володимирович** – к.т.н., доцент кафедри Комп'ютерних інформаційних технологій, Національний авіаційний університет, корпус №6 кімн.206.