

ПРОБЛЕМИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО СИНТЕЗУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ І МЕТОДИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Національний авіаційний університет

yuriy.ziatdinov@npp.nau.edu.ua,

asiia.klymova@npp.nau.edu.ua,

pav@nau.edu.ua

Вступ

Складні технічні системи (СТС) застосовують для розв'язання практичних завдань у багатьох предметних галузях: ракетобудуванні, літакобудуванні, освоєнні та використанні космічного простору, у ядерній фізиці при створенні ядерної зброї та атомних електростанцій тощо.

Створення СТС передбачає необхідність проведення глибокого опрацювання низки науково-технічних проблем, від яких багато в чому залежить тактико-технічні характеристики системи та успіх її застосування. У статті розглядаються СТС, що відносяться до ракетної та космічної техніки.

Аналіз розвитку ракетної та космічної техніки ведеться в багатьох країнах світу. / Серед цих країн лідирують США, Німеччина, Японія, Індія.

Авіаційно-космічні системи (АКС) з повітряним стартом є одним із найперспективніших транспортних засобів із доставки вантажів у космос. Вони дають змогу суттєво знизити експлуатаційні витрати, забезпечити високу оперативність, усунути (принаймні частково) два головних недоліки "класичних" ракет-носіїв: одноразовість застосування та необхідність у складній наземній інфраструктурі. Останнє особливо актуально для порівняння невеликих держав Європи, таких як Україна. Особливу увагу тому приділяють розробці двоступеневих АКС.

Проекти двоступеневих АКС передбачають використання як спеціально розроблених літаків-носіїв, так і вже наявних. В останньому випадку, що потребує менших витрат, як літак-носіїв розглядають, наприклад українській Ан-124 "Руслан" і американські "Боїнг-747", "Локхід-101" літаки. Значимість і велика вартість таких систем зумовили необхідність пошуку оптимальних варіантів розв'язання проблем структурного та параметричного синтезу.

Сучасний етап розвитку АКС характеризується значним ускладненням самого об'єкта дослідження, великою вартістю розроблення та появою багатоцільових комплексів, призначених для ефективного розв'язання широкого спектра задач. Отже, синтез АКС необхідно здійснювати на основі підходів, що враховують безліч чинників (багатокритеріального підходу) [1]. Тобто в процесі проектування системи необхідно одночасно враховувати і задовольняти різні, часто суперечливі вимоги до критеріїв ефективності системи.

Мета

Метою роботи є дослідження проблемних питань розв'язання задачі багатокритеріального синтезу СТС та методів що надають можливість оцінити альтернативні варіанти побудови системи, обґрунтувати і дати рекомендації щодо вибору оптимального варіанта її побудови.

Постановка завдання

Сучасний етап розвитку АКС характеризується значним ускладненням самого об'єкта дослідження, великою вартістю розроблення та появою багатоцільових комплексів, призначених для ефективного розв'язання широкого спектра задач. Тому проектування АКС є задачею оптимізації одночасно за декількома показниками якості, наприклад, набути якнайкращих значень для декількох характеристик літака (максимізувати дальність польоту, мінімізувати потрібну довжину злітно-посадкової смуги і злітну масу літака). Як правило, показники якості (частинні критерії) суперечливі й оптимізація за кожним із них призводить до різних значень проектних параметрів.

У тих випадках, коли не вдається знайти узагальнений показник якості, що містить вказані частинні критерії, виникає задача багатокритеріальної оптимізації. Отже задача багатокритеріальної оптимізації, обґрунтування та надання рекомендації щодо найбільш переважного варіанта побудови АКС є складним завданням векторної оптимізації [4], загальне формулювання якого полягає в наступному.

Під час синтезу система, яка проектується описується сукупністю параметрів $y = \{y_j\}_{j=1}^q \in Y$, які завданні в області визначення Y . Обрані параметри визначають тактико-технічні (концептуальні) характеристики системи, ідеологію її побудови, особливості застосування системи і можуть бути нормовані (зведені до єдиної розмірності). Для кожного параметра задаються обмеження:

$$\alpha_{jH} \leq y_j \leq \alpha_{jB}, \quad j = \overline{1, q}, \quad (1)$$

де α_{jH} , α_{jB} – відповідно допустимі нижня і верхня межі зміни чисельного значення j -го параметра. Обмеження на параметри визначаються на підставі аналізу прогнозованих умов створення і застосування АКС.

Якість прийнятого рішення (варіанта АКС) оцінюють за сукупністю суперечливих частинних критеріїв, що являють

собою функції параметрів y і утворюють m -вимірний вектор ефективності f :

$$f = f(y) = \{f_k(y)\}_{k=1}^m, \quad (2)$$

який має лежати в області допустимих значень F .

Передбачається, що зовнішні умови, які впливають на функціонування системи, відомі і фіксовані. Тоді векторний критерій функціонування системи є функцією тільки концептуальних параметрів $y' \in Y$. Потрібно визначити такі значення параметрів $y = \{y_j\}_{j=1}^q$, за яких оптимізується (для визначеності мінімізується) вектор критеріїв (2) за відомих обмеженнях (1):

$$y^* \in \underset{y \in Y}{\operatorname{argmin}} f(y). \quad (3)$$

Розв'язання задачі (3) передбачає виділення області ефективних рішень (області Парето) і вибір із цієї множини єдиного компромісного варіанта рішення.

Аналіз сучасних наукових досліджень

Науковим і технічним питанням синтезу (структурного і параметричного) присвячена велика кількість праць вітчизняних і зарубіжних учених, серед них роботи А.М. Вороніна, Ю.К. Зіатдінова, В.В. Подиновського, А.К. Міцітіса, І.А. Попова, М.Є. Салуквадзе, С.К. Баранова, В.Д. Ногіна, А.І. Козлова та ін. У цих роботах розглядається велика кількість сучасних методів, технологій та практичних підходів до вирішення складних завдань векторної оптимізації складних систем на початкових етапах їх розробки [1,5-8].

На основі аналізу праць [2,3] можна зробити висновок, що синтез складних систем необхідно здійснювати на основі підходів, що враховують безліч чинників (багатокритеріального підходу) Тобто в процесі проектування системи необхідно одночасно враховувати і задовольняти різні, часто суперечливі вимоги до критеріїв ефективності системи.

З огляду на результати аналізу [1-3,6] можна зазначити, що для конструктивного

розв'язання задачі багатокритеріального синтезу необхідно розв'язати такі проблемні питання векторної оптимізації:

- нормалізація критеріїв (завдання масштабування і приведення до єдиної міри частинних критеріїв);
- врахування пріоритету критеріїв;
- виділення області компромісів (області ефективних за Парето рішень);
- вибір схеми компромісів і єдиного рішення.

Вирішення проблемних питань задачі багатокритеріального синтезу СТС

Визначення області за Парето здійснюється на основі суперечливих частинних критеріїв. Частина з них може вимагати мінімізації, а інша – максимізації. Порівняння частинних критеріїв можливе тільки в нормалізованому просторі [5]. Під час нормалізації кожен окремий критерій вектора ефективності f піддається масштабуванню і приведенню до єдиної міри з використанням вектора обмежень.

У результаті отримують вектор ефективності (нормалізований):

$$f^0 = f^0(y) = \left\{ \frac{f_k(y)}{A_k} \right\}_{k=1}^m = \{f_k^0(y)\}_{k=1}^m$$

де A_k – k -я компонента вектора обмежень, що нормує. Відповідно до відомої теореми [4], ця операція є монотонною, і рішення, отримане в нормалізованому просторі критеріїв, не змінюється під час переходу до вихідного простору частинних критеріїв.

Способи вибору вектора, що нормує можуть бути різними. "Найсправедливішим" є метод, за якого компонентами нормувального вектора є супремуми частинних критеріїв, які визначені в просторі рішень:

$$A^0 = \{A_k\}_{k=1}^m = \{sup f_k(y)\}_{k=1}^m$$

Цей метод досить об'єктивний, не обмежує "прав" жодного з критеріїв і не залежить від їхнього масштабу. Застосування його ускладнене тільки тоді, коли

супремумом критеріїв є нескінченність, але в нашій постановці цей випадок виключається.

Коли окремі частинні критерії відрізняються один від одного за значущістю (використання системи в екстремальних умовах або умовах, для яких вона не розраховувалася), слід враховувати важливість (пріоритет) частинних критеріїв вектора ефективності f .

Під час розв'язання векторних задач використовують якісні (ряд пріоритету) і кількісні (вектор пріоритету) характеристики пріоритету. На основі поняття ряду пріоритету розв'язують лексикографічні задачі оптимізації. У цьому разі компоненти вектора ефективності f упорядковані за важливістю. Упорядкування виконується в експертній процедурі [4].

У задачі векторної оптимізації для вибору рішення необхідно визначити область ефективних рішень. Суть наявних підходів до розв'язання цього завдання полягає в наступному [6]. Серед усієї множини допустимих рішень розрізняють дві області, що не перетинаються. У першій (область згоди), рішення може бути поліпшено відразу за всіма критеріями вектора ефективності. Оскільки будь-яке рішення в цій області може бути поліпшене, то жодне з цих рішень не буде оптимальним (точніше компромісно – оптимальним). У другій області (область компромісів, область Парето, множина ефективних точок) поліпшення одного показника обов'язково призводить до погіршення хоча б одного з інших. Будь-яке оптимальне рішення належить області компромісних рішень.

За деяких умов опуклості допустимої множини критеріїв, визначення області Парето здійснюють на основі використання леми Карліна [4], наслідком якої є вираз області компромісів у вигляді рішення задачі параметричного програмування:

$$Y^K = \bigcup_{a \in X_a} \operatorname{argmin}_{k \in [1, m]} a_k f_k^0(y),$$

де $a = \{a_k\}_{k=1}^m$ – формальний векторний параметр, визначений на множині:

$$X_a = \{a \mid \sum_{k=1}^m a_k = 1, a_k \geq 0\}.$$

Коли умови опуклості допустимої множини критеріїв не дотримуються використовується згортка Гермейєра [8]

$$Y^K = \bigcup_{a \in X_a} \operatorname{argmin}_{y \in Y} \max_{k \in [1, m]} a_k f_k^0(y),$$

яка дозволяє виконати параметризацію області Парето. Згортка Гермейєра більш універсальна, але недолік її в тому, що вона не є аналітичною.

Формування області Парето за деяких приватних припущень істотно полегшується. У [6] запропоновано метод визначення множини ефективних рішень на основі аналізу критеріальних поверхонь. Критеріальні функції апроксимуються регресійною моделлю другого порядку. Метод ґрунтується на ідеї звуження допустимої області параметрів до ефективної, тобто виявлення з множини можливо завідомо невдалих, що поступаються іншим рішенням за всіма критеріями.

Привівши регресійні моделі другого порядку (функції критеріїв) до математичного вигляду [5] і використовуючи правила матричного диференціювання, визначають координати безумовних екстремумів критеріальних функцій (варіанти побудови системи, які відповідають точкам, оптимальним за всіма критеріями). За таким підходом множині оптимальних за Парето варіантів системи відповідає множина точок просторової кривої, що є геометричним місцем точок дотику ліній другого порядку, які належать сімействам кожного з частинних критеріїв.

Таким чином, вирішення задачі полягає у визначенні рівняння кривої (лінії Парето) у багатовимірному просторі досліджуваних концептуальних параметрів системи, яка проходить через точки дотику ліній другого порядку. Перевага такого підходу полягає в тому, що він

полегшує вибір компромісно-оптимальних рішень.

Вибір єдиного (оптимально-компромісного) варіанта побудови системи здійснюють на основі додаткової суб'єктивної інформації (про відносну важливість частинних критеріїв у заданій ситуації) від особи, яка приймає рішення (ОПР). На підставі цієї інформації формулюють конкретну схему компромісів [6], що дає змогу перейти від загального векторного виразу до скалярної згортки частинних критеріїв:

$$y^* = \operatorname{argmin}_{y \in Y} F[f(y)],$$

де $F(f)$ – скалярна функція від якої залежить від інформації ОПР.

Найчастіше на практиці застосовується лінійна згортка частинних критеріїв. Перевага: простота. Недолік: схема може бути застосовна лише в околицях точки, яка відповідає фіксованій ситуації. Вибір схеми компромісів являє собою згортання векторного критерію в єдину скалярну функцію $F(f(y))$, яка в різних ситуаціях є вираженням різних принципів оптимальності. Вимоги до функції $F(f(y))$:

- вона має бути гладкою і монотонною;
- у напружених ситуаціях вона має виражати принцип мінімаксу;
- у спокійних умовах – принцип інтегральної оптимальності;
- у проміжних випадках має приводити до оптимальних за Парето рішень.

Найпростішою і такою, що задовольняє викладені вище вимоги, є функція [2]

$$Y(a, f) = \sum_{k=1}^m a_k [1 - f_{0k}(y)]^{-1};$$

$$a_k \geq 0, \sum_{k=1}^m a_k = 1,$$

де $a_k = \text{const}$ – коефіцієнти регресії, що виражають переваги від імені ОПР за окремими критеріями.

У [6] пропонується нелінійна схема компромісів, якій відповідає модель векторної оптимізації, що в явному вигляді

залежить від характеристик напруженості ситуації:

$$y^* = \underset{y \in Y}{\operatorname{argmin}} \sum_{k=1}^m a_k [1 - f_{0k}(y)]^{-1}$$

Запропонована нелінійна схема компромісів має властивість безперервної адаптації до ситуації ухвалення векторного рішення. З цього погляду традиційні схеми компромісів можна розглядати як результат "лінеаризації" нелінійної схеми в різних "робочих точках" ситуацій.

Із проаналізованих проблем векторної оптимізації тільки одна – визначення області оптимальних за Парето рішень – є справді об'єктивною і має суворе наукове обґрунтування. Для розв'язання інших необхідно залучати евристичні елементи, включно з формуванням вихідної сукупності частинних критеріїв.

На практиці в більшості випадків для векторної оптимізації використовується лише обмежене коло методів і інструментів аналізу. Це пов'язано з такими проблемами:

- відсутність відповідного інструментарію для виконання процедур і аналізу;
- не застосовність того або іншого методу аналізу до тих початкових даних, якими оперує аналітик;
- висока вартість програмних продуктів (може досягати декількох тисяч доларів), які реалізують велику кількість "просунутих" пошукових методів і аналіз даних та ін.

Тому ще однією проблемою під час вирішення векторних оптимізаційних задач є вибір інструментальних та методичних засобів для проведення наукових і прикладних досліджень, інженерних робіт. У теперішній час існує велика кількість методів і програмних продуктів (наприклад, *SPSS*, ПС ПРИАМ, *STATISTICA*, *ProSto*, *TURBO-OPTIM* і т.д.), які надають широкі можливості для вирішення задачі векторної оптимізації і ін.), які надають широкі можливості для

вирішення задачі векторної оптимізації і проведення різних видів аналізу даних.

Висновки

У результаті проведеного аналізу зазначені основні проблемні питання багатокритеріального синтезу, від яких залежить тактико-технічні характеристики системи та успіх її застосування. Запропоновані наукові підходи та методи їх вирішення надають можливість оцінити альтернативні варіанти побудови системи, обґрунтувати і дати рекомендації щодо вибору оптимального варіанта її побудови.

Результати проведеного аналізу проблем векторної оптимізації, розглянуті на прикладі синтезу АКС систем, можуть бути використані й під час дослідження складних систем в інших предметних областях.

Література

1. Климова А.С., Куклінський М.В. Параметричний синтез авіаційно-космічних систем на основі багатокритеріальної оптимізації і математичного моделювання. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. В. 3(59). С. 61–64.
2. Albert Voronin, Yuriy Ziatdinov. Optimization problem: Systemic approach. *International Journal Information Theories and Applications*. 2020. V. 27. No. 1. P. 52–81.
3. Воронін А.М., Зіатдінов Ю.К. Багатокритеріальна оцінка проблемних ситуацій. *Проблеми інформатизації та управління*. 2022. В. 3(71). С. 12–17.
4. Воронін А.М., Зіатдінов Ю.К., Козлов О.І., Чабанюк В.С. Векторна оптимізація динамічних систем. Київ : Техніка, 1999. 284 с.
5. Климова А.С. Алгоритм створення і оцінювання якості багатofакторних регресійних моделей в задачах векторної оптимізації складних систем. *Труди академії НАОУ*, 2013. В. 3(90). С. 132–137.
6. Климова А.С. Векторна оптимізація технічного вигляду авіаційно-космічної системи з використанням нелінійної схеми компромісів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2009. Вип. 2(26). С. 68–71.

7. Климова А.С. Моделі та методи багатокритеріальної оптимізації складних технічних систем. *Технологічні системи*. 2009. № 2(46). С.67–70.

8. Климова А.С., Куклинський М.В., Савченко А.С., Харченко О.Г.

Математичні моделі функцій частинних критеріїв в задачах векторної оптимізації складних технічних систем. *Наукоємні технології*. 2020. Т. 1, 44. В. 4. С. 417–425.

Зіатдінов Ю.К., Климова А.С., Полухін А.В.

ПРОБЛЕМИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО СИНТЕЗУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ І МЕТОДИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

У статті розглядаються основні проблемні питання та методи вирішення задачі багатокритеріального параметричного синтезу складних технічних систем під час науково-технічних досліджень на початкових етапах їх розробки. У якості складних технічних систем розглядаються системи, що відносяться до ракетної та космічної техніки.

Розвиток складних авіаційних систем на сьогоднішній день в умовах обмеження фінансово-виробничих ресурсів обумовлюють необхідність проведення глибокого опрацювання низки науково-технічних проблем, від яких багато в чому залежить тактико-технічні характеристики системи та успіх її застосування. Вибір тактико-технічні характеристики системи і подальша їхня оптимізація є задачею багатокритеріального параметричного синтезу.

У статті розглядається загальне формулювання задачі багатокритеріальної оптимізації, обґрунтування та надання рекомендації щодо найбільш переважного варіанта побудови складної системи. Розглянуті наступні проблемні питання векторної оптимізації: нормалізація критеріїв; врахування пріоритету критеріїв; виділення області компромісів; вибір схеми компромісів і єдиного рішення. Крім того, ще однією проблемою під час вирішення векторних оптимізаційних задач є вибір інструментальних та методичних засобів для проведення наукових і прикладних досліджень, інженерних робіт.

Для вирішення зазначених проблемних питань у статті розглянуті особливі методи і алгоритми багатокритеріального параметричного синтезу і математичного моделювання щодо вибору оптимального варіанта побудови системи. Ці методи дають можливість оцінити альтернативні варіанти побудови системи, обґрунтувати і дати рекомендації щодо найбільш переважного варіанта. У теперішній час існує велика кількість методів і програмних продуктів які надають широкі можливості для вирішення задачі векторної оптимізації і проведення різних видів аналізу даних. Наприклад, найбільш прийнятним і ефективним є SPSS, ПС ПРИАМ, STATISTICA, ProSto, а також використання на базі інтегрованого пакета Microsoft Office великої кількості існуючих і новостворених модулів.

Ключові слова: складні технічні системи, багатокритеріальна оптимізація, синтез оптимальної системи.

Ziatdinov Yu.K., Klymova A.S., Polukhin A.V.

PROBLEMS OF MULTI-CRITERIA SYNTHESIS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AND METHODS OF THEIR SOLUTION

The article examines the main problematic issues and methods of solving the problem of multi-criteria parametric synthesis of complex technical systems during scientific and technical

research at the initial stages of their development. As complex technical systems, systems related to rocket and space technology are considered.

The development of complex aviation systems today, in the conditions of the limitation of financial and production resources, necessitates the in-depth study of a number of scientific and technical problems, which largely depend on the tactical and technical characteristics of the system and the success of its application. The selection of tactical and technical characteristics of the system and their further optimization is the task of multi-criteria parametric synthesis.

The article deals with the general formulation of the multi-criteria optimization problem, justification and recommendations regarding the most preferable option for building a complex system. The following problematic issues of vector optimization are considered: normalization of criteria; taking into account the priority of criteria; highlighting the area of compromises; choosing a scheme of compromises and a single solution. In addition, another problem when solving vector optimization problems is the choice of instrumental and methodical means for conducting scientific and applied research, engineering works.

In order to solve these problematic issues, the article considers special methods and algorithms of multi-criteria parametric synthesis and mathematical modeling regarding the selection of the optimal system construction option. These methods make it possible to evaluate alternative options for building a system, justify and give recommendations regarding the most preferable option. Currently, there are a large number of methods and software products that provide wide opportunities for solving the problem of vector optimization and conducting various types of data analysis. For example, the most acceptable and effective are SPSS, PS PRIAM, STATISTICA, ProSto, as well as the use of a large number of existing and newly created modules based on the integrated Microsoft Office package.

Keywords: complex technical systems, multi-criteria optimization, synthesis of an optimal system.