

УДК 621.396.6

**С.Я. ЯЦЕНКО, М.Ф. СИДОРЕНКО, М.П. ЄВСЮКОВ, І.Є. КИТАЙЧУК,  
В.М. ДАШКІЄВ**

*НТ СКБ "ПОЛСВТ" філія ДНВП "Об'єднання Комунар", Харків, Україна*

## **КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ СКЛАДНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА**

*Запропоновано метод оптимізації подоби технічної системи, що проектується, за сукупністю критеріїв оцінки її якості. Суть метода полягає в наданні критеріям оцінки якості виробу вагових коефіцієнтів, відповідно до їх значимості, пошуці локальних екстремумів за кожним частковим критерієм з відповідним ваговим коефіцієнтом, і в обранні, в якості оптимуму, точки, рівновіддаленої від знайдених локальних екстремумів. Метод дає можливість знаходити наближене рішення в умовах, коли аналітичний вираз цільової функції є відсутнім. Для практичної реалізації отриманих наукових рішень, проведено аналіз джерел відмов та опрацьовано і впроваджено комплексну програму забезпечення надійності. За створеною методикою спроектовано і розроблено електронний регулятор ЭР2500 турбовального авіаційного двигуна. Регулятор успішно витримує комплекс випробувань, є запущеним до серійного виробництва*

**Ключові слова:** багатокритеріальна оптимізація, проектування електронних систем, відмовостійкість

### **Прикладна задача дослідження**

Дослідження виконувалося в рамках прикладної задачі: розробки електронного регулятора (ЕР) авіаційного турбовального двигуна. Силова установка (СУ) повітряного судна, разом з ЕР, є критично відповідальними щодо безпеки польоту і людей на борту. Розробка бортових радіоелектронних систем повітряних суден ускладнюється множиною суперечливих критеріїв оцінки: мінімуму маси й об'єму, вартості, (нині й вимогами імпортозаміщення), тощо. ЕР, як складова згаданих систем, також належить до систем, особливо відповідальних щодо безпеки людей. Отже, практика предметної області вимагає, щоб протягом усієї тривалості життєвого циклу виробу імовірність відмови була мінімальною. По-друге, в разі відмови, мінімізувати погіршення безпеки повітряного судна і людей на борту. І, по-третє – задовольняти специфічні вимоги аерокосмічної галузі, загальні для усіх радіоелектронних систем: мінімуму маси, об'єму, вартості, максимуму точності, електромагнітної сумісності, тощо.

### **Аналіз стану предметної області науки**

Відомий ряд робіт по відмовостійкості. Так, у [1] застосовано індекс надійності за Квіркком для виявлення ненадійних елементів системи. Підхід ґрунтується на досвіді, вимагає високої кваліфікації спеціалістів, призначений для про-

ектування окремих елементів і непридатний для складних систем.

Підхід у [2] ґрунтується на складанні матриць стану систем, задіяних на кожному етапі польоту, зі значеннями ймовірностей відмов кожної системи зі статистики льотних пригод. Це ефективно для простих електронно-механічних систем без нелінійних залежностей між джерелами виникнення відмов.

У [3] пропонується «коефіцієнт якості виробництва» апаратного забезпечення (АЗ). Модель прогнозу потоку відмов є сумою потоків відмов АЗ та потоку відмов програмного забезпечення (ПЗ), що вважається фіксованим. Підхід не охоплює всі можливі джерела відмов, і його недостатньо для практичного застосування.

### **Постановка наукової задачі**

Аналіз джерел показує, що існує наукова задача створення методу розробки складних, відповідальних радіоелектронних систем, що враховує можливі джерела відмов, і дозволяє мінімізувати ймовірність відмови, та (або) шкоду від неї. Пошук оптимальних рішень при проектуванні виробу є тотожним до оптимального керування складною динамічною системою за критерієм мінімуму витрати ресурсів.

Досвід підказує, що область рішень є безперервною. З практики відомо, що цільова функція біля екстремуму досягає насичення. Тому пошук точних координат оптимуму

чисельними методами є вкрай ускладненим. Без істотного погіршення точності, можна застосувати «принцип  $\varepsilon$ -оптимальності» [4], який стверджує, що коли цільова функція безперервна і гладка, а в межах деякої  $\varepsilon$ -околиці від точки екстремуму різниця між значенням цільової функції в довільній точці й екстремумом є меншою за  $\varepsilon$ , та якщо екстремум недосяжний, або його точне положення встановити неможливо – наближено оптимальною вважається будь-яка точка в межах області  $\varepsilon$ .

Для оптимального керування динамічною системою використовується принцип максимуму Понтрягіна [5]. Але в прикладних задачах є множина апріорно рівнозначних критеріїв, що визначаються сукупністю одних і тих же керуючих діянь. Ці критерії конкурують між собою за один і той самий ресурс. Задача багатокритеріальної оптимізації розглядалася у [6] і [7], проте акцент зроблено на виборі найрівномірнішої послідовності пробних точок для чисельного вирішення – так званих ЛП<sub>T</sub> – послідовностей. Задача оптимізації там не завершена: обирати оптимум пропонується особі, що приймає рішення в конкретній прикладній задачі.

#### Невирішена частина загальної проблеми

В [8] описано метод попарного порівняння: пошук екстремуму кожної критеріальної функції окремо, з побудовою матриці «компромісного рішення». Проте даний метод є непридатним для пошуку оптимального рішення, передбачаючи пошук локального екстремуму за кожним критерієм при фіксованих значеннях інших цільових функцій.

В [9] описано метод агрегування цільових функцій: об'єднання множини цільових функцій в інтегральну функцію корисності і пошук її екстремуму. Але він придатний там, де часткові цільові функції мають загальну одиницю виміру.

Пропонується новий принцип «компромісу критеріїв». В основу його покладена така гіпотеза. Припустимо, існує  $n$ -вимірний простір  $K$ , кожен вимір якого відповідає одному з  $n$  критеріїв якості. В  $K$  існує  $n$ -вимірний простір координат, кожна вісь якої, з обраним масштабним коефіцієнтом, відповідає чисельній мірі одного з критеріїв якості.

Припустимо, існує  $m$ -вимірний простір  $A$ , кожен з вимірів якого відповідає одному з  $m$  керуючих діянь (параметрів, аргументів цільової функції). В цьому просторі існує  $m$ -вимірний простір координат, кожна вісь якої, з обраним масштабним коефіцієнтом, відповідає одному з керуючих діянь.

Вважаємо, що існує математична модель оптимізованої системи. Тобто, існує якась

перетворення, що кожній точці з області  $A$  ставить у відповідність єдину точку простору  $K$ . В просторі  $A$  відокремлюється паралелепіпед  $P$  відповідно до накладених параметричних обмежень. В просторі  $K$  відокремлюється паралелепіпед  $R$ , відповідно до накладених функціональних обмежень. За потрапляння пробної точки за межі паралелепіпеда  $R$ , відповідна цій точці комбінація вихідних параметрів  $X$  вважається забороненою і виключається з подальшого розгляду.

Кожній критеріальній функції приписується ваговий коефіцієнт  $M$ , що визначає значимість даного критерію. Значення  $M$  варіюються в залежності від умов практичної задачі. Як правило, значення  $M$  призначаються методом експертних оцінок.

В заданій області  $A$  за допомогою методу «ЛП-послідовностей» (або іншого) обирається множина пробних точок – варіантів сполучень вихідних даних. Для кожного варіанту здійснюється чисельна реалізація моделі. В отриманій множині значень критеріальних функцій, за допомогою одного з чисельних методів пошуку екстремуму здійснюється пошук наближених значень локальних екстремумів кожної з критеріальних функцій в заданій області пошуку. Далі, для кожного отриманого значення критеріальної функції в просторі  $A$  здійснюється обчислення «відстані» до значення локального екстремуму кожної критеріальної функції – з урахуванням обраних значень вагових коефіцієнтів. Точка, мінімально «віддалена» від усіх локальних екстремумів – в просторі цільових функцій – і вважається компромісом критеріїв.

#### Адаптація до прикладної задачі

Описаний метод застосовано для вирішення практичної задачі – проектування ЕР складної технічної системи (турбовального авіаційного двигуна). Вона мала певні особливості, стосовно до запропонованого теоретичного апарату. Область пошуку була скінченною, і складалася з декількох альтернативних варіантів схемних рішень, комплектації АЗ (відповідно до існуючого асортименту радіоелектронних компонентів), а також кількох варіантів алгоритмів ПЗ (і кожен варіант в області пошуку передбачав довільне сполучення цих складових). А процес вирішення оптимізаційної задачі зводився до вибору одного найкращого варіанту з множини можливих.

Специфіка предметної області обумовила варіант з одним головним критерієм оцінки (відмовостійкістю) і множиною допоміжних критеріїв (маси, об'єму, вартості проектування та виробництва, тощо). В процесі проектування

чисельне вираження якості оцінки виробу за призначенням, тобто, точність функціонування регулятора, що було задано Головним Замовником в Технічному Завданні на проектування, було використано в якості фіксованого функціонального обмеження, обов'язкового для виконання – і процедури оптимізації не зазнавало.

В якості чисельного вираження головного критерію оцінки обрано ймовірність настання відмови з ваговим коефіцієнтом 1. Вагові коефіцієнти допоміжних критеріїв визначалися методом експертних оцінок, на підставі досвіду розробки подібних виробів і додавалися як десяткові, чи соті частки від 1.

Для коректного проведення дослідження, а також для втілення на практиці теоретично обчислених оптимальних результатів, на підприємстві опрацьовано і втілено комплексну і багатоступінчасту програму забезпечення надійності, яка охоплює аналіз джерел відмов виробу та реалізацію заходів по забезпеченню відмовостійкості на усіх етапах життєвого циклу ЕР.

#### **Аналіз джерел відмов ЕР**

Особливістю практичного застосування ЕР є сукупність різноманітних джерел відмов різної природи, специфічних для кожного етапу життєвого циклу. Тому максимум обраного критерію досягається максимізацією часткових критеріїв відмовостійкості для кожного джерела відмов усуненням або мінімізацією «негативної інтерференції» обраних заходів.

Етап проектування: концептуальні помилки, помилки в проекті, схемних рішеннях та алгоритмах функціонування; помилки в програмному коді, конфлікт ПЗ та АЗ, конфлікт власного і пропріетарного ПЗ, помилки в пропріетарному ПЗ.

Етап виробництва: застосування неякісних матеріалів та заготовок, або непрацездатних покупних електрорадіовиробів, брак при виготовленні деталей та їх складанні, пошкодження.

Етап практичної експлуатації: недотримання умов експлуатації та некоректні дії обслуговуючого, або льотного персоналу; несанкціоновані зміна програмного коду або втручання в обчислювальний процес, пошкодження носія програмного коду, помилки в коді; повне припинення, або перебої живлення; відмова самого ЕР, датчиків, виконавчих механізмів, електромагнітна несумісність бортового радіоелектронного обладнання; діяння електромагнітних перешкод та інших зовнішніх факторів.

#### **Зміст комплексної програми забезпечення надійності ЕР**

За результатами аналізу джерел відмов було розроблено комплексну програму забезпечення надійності, яка передбачає відповідні заходи згідно з етапами життєвого циклу ЕР.

Заходи, закладені в архітектуру і алгоритм функціонування ЕР на етапі його проектування:

- Виключення з архітектури усіх компонентів, які не є задіяні у реалізації функціонального призначення ЕР, або у забезпеченні його надійності.

- Застосування архітектуру без операційної системи, або іншого пропріетарного ПЗ.

- Тестування ПЗ при усіх можливих сполученнях умов, згідно з вимогами КТ-178В.

- Запис нової версії програмного коду тільки за допомогою комплексу контрольно-перевірочної апаратури, в програмний код якого введено ієрархічну систему пріоритетів допуску, з паролями.

Заходи, реалізовані в алгоритмі функціонування ЕР в його практичній експлуатації:

- За критичних відмов передача керування гідромеханічній системі. За відмови одного з контурів керування ЕР зберігає працездатність решти.

- Трьохступінчастий алгоритм контролю справності датчиків та каналів вимірювання їх сигналів – градієнтний, допусків і взаємний контроль.

- Живлення від двох альтернативних джерел електроживлення.

- Контроль справності датчиків та кіл керування виконавчими механізмами і табло, контроль збоїв та повторний перезапуск обчислювального пристрою.

- Захист АЗ від коротких замикань, перенапружень, перегрівів та імпульсних перешкод.

Заходи забезпечення надійності АЗ до впливу кліматичних та механічних факторів: застосування термостійких матеріалів і покупних електрорадіовиробів, мінімізація власного енергоспоживання, конструктивні і технологічні заходи, підбір протикорозійних покриттів.

Заходи з унеможливлення загроз життю та безпеці людини при функціонуванні ЕР на усіх етапах його життєвого циклу: відповідність вимогам з вибухонебезпеки, пожежної безпеки, електробезпеки, унеможливлення загроз життю та безпеці людини під час виробництва, зберігання, транспортування та технічного обслуговування.

Заходи з усунення (мінімізації) відмов, спричинених технологічними чинниками при виробництві:

– Вибір постачальників, вхідний контроль матеріалів та покупних компонентів.

– Поопераційний технічний контроль якості виготовлення та складання деталей і виробу.

– Допусковий контроль величин опору та напруги в контрольних точках схеми.

– Випробування готового ЕР на вплив фізичних чинників польоту (переохолодження, перегрів, термічний шок, вібрація).

Методологічним забезпеченням надійності є створена експлуатаційна документація, що чітко й однозначно регламентує умови, послідовність дій працівників при роботі з виробом на усіх етапах життєвого циклу.

#### Висновки

Теоретична частина. Запропоновано метод оптимізації при проектуванні технічної системи за сукупністю критеріїв оцінки її якості. Він дає можливість знаходити наближене рішення в умовах, коли аналітичний вираз цільової функції є відсутнім.

Практична частина. За створеною методикою спроектовано і розроблено ЕР турбовального авіаційного двигуна ЭР2500, який успішно витримав комплекс випробувань, є запущеним до серійного виробництва. На ЭР2500 отримано Свідоцтво про придатність комплектуючого виробу Державіаслужби України і Авіареєстру Міждержавного Авіаційного Комітету (АР МАК).

Подальший напрямок досліджень в даній галузі слід очікувати у створенні методик визначення вагових коефіцієнтів, що використовуються в запропонованому методі.

#### Література

1. Капур К. Надежность и проектирование систем [Текст] : пер. с англ. / К. Капур, Л. Ламбертон. – М : Мир, 1980. – 605 с.

2. Мехоношин В. С. Основы теории авиационных эргатических систем [Текст] : учеб. пособие / В.С. Мехоношин. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2011. – 75 с.

3. Artyukhova M. Prediction of equipment multifactor quality [Text] / M. Artyukhova, S. Poleskiy // Materials of X International Scientific and Practical Conference «Innovations based on information and communication technologies – INFO-2013», October, 1-10, 2013 – Sochi, Russian Federation. – P. 500-503

4. Айзекс Руфус. Дифференциальные игры [Текст] : пер. с англ. / Руфус Айзекс. – М. : Мир, 1976. – 234 с.

5. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев ; под ред. Г. Гроше и В. Циглера. – М. : Наука, 1986 – 544 с.

6. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И. М. Соболев, Р. Б. Статников ; под ред. Н. Н. Калиткина. – М. : Наука, 1981. – 110с.

7. Статников Р. Б. Многокритериальное проектирование машин [Текст] / Р. Б. Статников, И. Б. Матусов. – М. : Знание, 1989. – 48 с.

8. Агранович Б. Л. Системный анализ деятельности и разработка проектных решений по автоматизации управления вузом [Текст] / Б. Л. Агранович, И. П. Чучалин, В. З. Ямпольский. – М. : Наука, 1985. – С. 5-14.

9. Евланов Л. Г. Теория и практика принятия решений [Текст] / Л. Г. Евланов. – М. : Экономика, 1984. – 176 с.

Надійшла до редакції 30.05.2016

#### **С.Я. Яценко, Н.Ф. Сидоренко, Н.П. Евсюков, И.Е. Китайчук, В.Н. Дашкиев. Комплексный подход к решению многокритериальной задачи разработки электронной системы регулирования сложных технических объектов**

*Предложен метод оптимизации облика технической системы, проектируемой по совокупности критериев оценки качества. Сущность метода состоит в: предоставлении критериям оценки качества изделия весовых коэффициентов, соответственно их значимости, поиске локальных экстремумов по каждому частичному критерию с соответствующим весовым коэффициентом, и в выборе, в качестве искомого оптимума точки, равноудаленной от найденных локальных экстремумов. Метод дает возможность находить приближенное решение в условиях, когда аналитическое выражение целевой функции отсутствует. Для практической реализации полученных научных решений проведен анализ источников отказов, разработана и внедрена комплексная программа обеспечения надежности. По созданной методике спроектирован и производится электронный регулятор турбовального авиационного двигателя ЭР2500. Регулятор успешно выдержал комплекс испытаний, запущен в серийное производство.*

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, проектирование электронных систем, отказоустойчивость.

**S.YA. Yacenko, M.F. Sidorenko, M.P. Yevsyukov, I.YE. Kytaychuk, V.M. Dashkiyev. Integrated approach to solve a multi-criteria problem of sophisticated technical object electronical governing system development**

*The technical system architecture optimizing method, based on a set of quality evaluating criteria has been proposed. The essence of method is to provide criteria weights coefficients for due to their importance, to search local extremes positions for each partial criterion with corresponding weights and to elect the point equidistant from local extremes as required optimum. The method makes it possible to find approximate solutions in circumstances where analytical expression of the objective function is missing. The analysis of sources of failures has been executed for practical implementation of scientific solutions as like as comprehensive program to ensure a reliability has been implemented. The aircraft turboshaft engine electronic regulator ЭР2500 has been designed and produced thanks to the established methodology. The ЭР2500 regulator has successfully passed a set of tests and is running to serial production and installed.*

**Keywords:** multicriteria optimization, electronic systems development, fault-tolerance.