

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

МЕНЯЙЛОВ ЄВГЕН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 519.6: 681.518.2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ
ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВХІДНИХ ДАНИХ

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Угрюмов Михайло Леонідович
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
професор кафедри теоретичної та прикладної
системотехніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Новожилова Марина Володимирівна,
завідувач кафедри прикладної математики та
інформаційних технологій Харківського національного
університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

доктор технічних наук, професор
Петров Костянтин Едуардович,
завідувач кафедри інформаційних управляючих систем
Харківського національного університету
радіоелектроніки.

Захист відбудеться «12» травня 2021 р. о 17-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 6, ауд. 3-18.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий 09 квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09

Олена ТОЛСТОЛУЗЬКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з актуальних проблем при створенні об'єктів нової техніки є проблема зниження витрат на доведення і при експлуатації складних технічних систем (СТС). Вирішення цієї технічної проблеми можливо за рахунок впровадження в практику методів оптимального проєктування. При розробці останніх виникають математичні проблеми: оцінювання невизначеностей, структуризація регуляризованих алгоритмів і висока обчислювальна складність методів синтезу квазірішення практичних завдань в умовах невизначеності вхідних даних.

Зниження ризиків великих витрат на доопрацювання СТС в умовах серійного виробництва можливе за рахунок впровадження в практику методів оптимального проєктування, заснованих на застосуванні методів машинного навчання, нових математичних моделей і методів розв'язання багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації (БЗСО).

Як відомо, при структуризації БЗСО виникає невизначеність у виборі метрик при оцінюванні цільових функцій і шуканих величин (параметрів, керуючих змінних, або змінних стану) в разі, коли дані є випадковими величинами. При цьому для розв'язання некоректних задач цього типу слід застосовувати регуляризовані алгоритми, що забезпечать отримання стабільних (робастних) оцінок шуканих величин, а математичні моделі, синтезовані на їх основі, будуть мати властивість робастності.

Розгляду задач математичного моделювання і системного аналізу, оптимізації (синтезу) і теорії прийняття рішень при створенні СТС приділяється велика увага як вченими в Україні, так і за її межами. Серед вітчизняних дослідників необхідно відзначити Ю. П. Зайченко, М. З. Згуровського, Н. Д. Панкратову, А. Н. Вороніна, О. Є. Федоровича, І. Б. Сіроджу, Е. Г. Петрова, С. В. Єршова, Ф. А. Стоянова, Е. В. Бодянського; серед дослідників ближнього зарубіжжя – І. N. Egorov, G. V. Kretinin, A. P. Karpenko, K. A. Vinogradov, A. N. Тихонова, А. Б. Бакушинського, Н. Н. Воробйова, В. Н. Вапніка; серед дослідників далекого зарубіжжя – М. Li, A. E. Gelfand, S. Lee, T. Erfani, S. V. Utyuzhnikov. Роботи цих та багатьох інших вчених значною мірою сприяли прогресу сучасних математичних методів системного аналізу.

Аналіз існуючих літературних джерел показав, що при розробці методів оцінювання цільових функцій і шуканих величин в багатокритеріальних задачах ідентифікації математичних моделей, оптимізації та прийняття рішень, особливо у випадках невизначеності вхідних даних, виникає ряд математичних проблем:

- формування системи переваг особи, що приймає рішення (ОПР): узагальнених (скалярних згорток) цільових функцій, системи обмежень, множини коректності;

- структуризація регуляризованих алгоритмів синтезу квазірішення;
- висока обчислювальна складність описаних методів.

У зв'язку з цим тема дисертації має важливе наукове і практичне значення, оскільки вона спрямована на вирішення актуального наукового завдання, яке полягає в розробці математичних моделей, обчислювальних методів і комп'ютерних

систем, що їх реалізують, для вдосконалення технічних систем на прикладі об'єктів авіаційної техніки в умовах невизначеності вхідних даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи пов'язана з дослідженнями, які проводилися в 2011–2016 рр. в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі інформатики відповідно до державних науково-технічних програм і планів прикладних науково-дослідних робіт (НДР) Міністерства освіти і науки України, а також відповідно до планів НДР підприємства АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя). Найважливішими з них є: Д303-21/2011 «Методологія проектування елементів та інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів» (Д/Р 0111U001072), Д303-15/2015 «Методологія удосконалення промислових паливно-енергетичних комплексів и авіаційних двигунів з використанням інформаційно-вимірювальних систем моніторингу змінних станів в умовах невизначеності вхідних даних» (Д/Р 115U000838).

Участь автора в зазначених роботах полягала в розробці математичних моделей і методів стохастичної оптимізації, а також в дослідженні властивостей розроблених моделей і методів. Крім того, автором розроблено прикладне програмне забезпечення для вдосконалення об'єктів авіаційної техніки та їх підсистем в умовах невизначеності вхідних даних.

Мета і завдання дослідження. Основна мета дисертаційного дослідження – підвищення ефективності процесів пошуку раціональних проектних рішень при вдосконаленні технічних систем на прикладі об'єктів авіаційної техніки за рахунок розробки математичних моделей, обчислювальних методів і комп'ютерних систем, що їх реалізують, в умовах невизначеності вхідних даних.

Для досягнення цієї мети в дисертації були сформульовані і вирішені наступні завдання:

- провести аналіз існуючих математичних моделей і обчислювальних методів, а також сучасних прикладних інформаційних технологій, які застосовуються для вдосконалення СТС в умовах невизначеності вхідних даних;

- розробити системну модель процесу вдосконалення технічних систем з урахуванням стохастичної природи вхідних даних;

- створити математичні моделі і методи розв'язання нелінійних БЗСО: метод синтезу скалярних згорток функцій вибору для багатокритеріальних задач прийняття рішень, метод синтезу квазірішення нелінійних багатокритеріальних задач системної модифікації, метод розв'язання задачі стохастичної оптимізації зі змішаними умовами;

- розробити склад і структуру інтерактивної комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень (КСППР) при вдосконаленні об'єктів авіаційної техніки в умовах невизначеності вхідних даних;

- впровадити результати дисертаційної роботи в практику вирішення завдань вдосконалення СТС на прикладах вдосконалення підсистем турбореактивних двигунів (ТРД) і турбореактивних двоконтурних двигунів (ТРДД);

– розробити науково-практичні рекомендації щодо використання розробленої КСППР і результатів проведених досліджень в практиці автоматизованого проєктування підсистем ТРД і ТРДД на підприємствах Міністерства промислової політики України.

Об’єкт дослідження – процеси вдосконалення СТС в умовах апріорної невизначеності вхідних даних.

Предмет дослідження – математичні моделі та обчислювальні методи пошуку раціональних рішень багатокритеріальних задач вдосконалення СТС в детермінованому і стохастичному формулюваннях.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні при формалізації представлення об’єкту дослідження, структуризації математичних моделей і обчислювальних методів розв’язання БЗСО СТС використовувалися методи системного аналізу та теорії прийняття рішень. При розробці методу розв’язання задачі про призначення допусків на параметри СТС використовувалися підходи і методи теорії взаємозамінності і стандартизації, теорії ймовірностей, математичної статистики. При розробці обчислювальних методів і алгоритмів пошуку квазірішення завдань БЗСО СТС використовувалися методи теорії обернених задач та математичного програмування. При побудові обчислювального методу розв’язання БЗСО застосовувалися моделі і методи теорії штучного інтелекту – еволюційні методи (ЕМ), метод звужуючих околиць. При синтезі складу і структури прикладного програмного забезпечення використовувалися теорії формальних та алгоритмічних систем, а також сучасні технології створення комп’ютерних програм.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

1. *Уперше* розроблена системна математична модель синтезу рішень багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації, яка на відміну від існуючих дозволяє здійснювати пошук раціональних рішень багатокритеріальних MV-задач шляхом створення ієрархічної дворівневої схеми синтезу рішень, що включає: побудову сурогатних моделей систем і процесів, а потім – оцінювання шуканих величин при параметричній невизначеності вхідних даних, що забезпечує підвищення ефективності прийняття рішень.

2. *Удосконалено:*

а) метод синтезу скалярних згорток цільових функцій для задач оптимізації та прийняття рішень, заснований на законі необхідності різноманітності (закон У. Р. Ешбі), концепції ступеневих середніх А. Н. Колмогорова та принципі максимуму правдоподібності, в якому у якості міри близькості двох багатовимірних репрезентативних вибірок використовуються статистики Стюдента і В. І. Романовського, що забезпечує можливість структурувати систему переваг особи, яка приймає рішення, для багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації та при прийнятті рішень в детермінованому і стохастичному (MV-, MN-завдання) формулюваннях;

б) метод розв’язання нелінійних багатокритеріальних задач модифікації шляхом синтезу квазірішення при наявності обмежень на клас допустимих рішень, що здійснюється регуляризацією пошуку мінімуму згладжуваного функціоналу у формі скалярної згортки цільових функцій на основі статистик Стюдента і В. І. Романовського, еволюційним шляхом із застосуванням процедури адаптації

при виборі його параметрів в процесі пошуку рішень, що забезпечує коректність методу розв'язання завдань вдосконалення систем в детермінованому і стохастичному (MV-завдання) формулюваннях;

в) еволюційний метод синтезу рішень багатокритеріальних задач модифікації в детермінованому і стохастичному (MV-завдання) формулюваннях, заснований на спільному використанні генетичного алгоритму зі змінними від епохи до епохи параметрами: операторів речового кодування, функції пристосованості та релаксації, а також методу звужування околиць, що забезпечує робастне оцінювання шуканих величин при параметричній невизначеності вхідних даних і зниження часової складності методу.

3. *Отримала* подальший розвиток теорія побудови комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень на основі запропонованих математичних моделей і методів для розв'язання в стохастичному формулюванні завдань вдосконалення СТС, застосування яких дозволяє забезпечити підвищення ефективності процесів пошуку раціональних проєктних рішень на етапах розробки, модифікації та доведення СТС.

Практичне значення отриманих результатів. В сукупності, отримані математичні моделі та обчислювальні методи розв'язання БЗСО великої розмірності є науково-методичною основою для розробки алгоритмів, методик та інструментальних засобів прикладної інформаційної технології пошуку раціональних проєктних рішень при вдосконаленні об'єктів авіаційної техніки.

Всі розроблені моделі і методи доведені до рівня інженерних методик, програмних засобів комп'ютерної реалізації, висока ефективність яких обґрунтована теоретично і підтверджена практично.

Результати дисертаційного дослідження були використані при ескізному та робочому проєктуванні газотурбінних двигунів на АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), що дозволило скоротити час на розрахунки оптимізації двоступеневого осьового компресора (акт впровадження від 06.07.2018 р.). В результаті збільшився ККД цих ступенів (без зниження запасів газодинамічної стійкості) на розрахунковій витраті повітря і розрахунковій частоті обертання. Так само результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (м. Харків) в рамках навчального курсу «Системи і методи прийняття рішень» і при курсовому, дипломному проєктуванні під час підготовки бакалаврів і магістрів на кафедрі математичного моделювання і штучного інтелекту (акт впровадження від 18.12.2016 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 31 науковій праці, з них 7 статей наукових фахових виданнях України [1–7]; 1 стаття у зарубіжному спеціалізованому виданні, проіндексованому в міжнародній базі Scopus [8]; 1 стаття у зарубіжному спеціалізованому виданні [9]; 18 наукових праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації [10–27]; 4 публікації, що додатково відображають наукові результати дисертації [28–31] у тому числі 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерну програму) [30, 31].

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У

публікаціях, які написані у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: застосування ЕМ для розв'язання завдання визначення закону регулювання поворотними поворотними спрямляючими апаратами багатоступінчастого осьового компресора (БОК) [1, 10, 11]; моделі і методи інформаційної технології для вирішення завдань вдосконалення складних технічних систем [2, 13–15, 27]; огляд і аналіз модифікацій генетичних алгоритмів [3, 16]; системна модель прийняття рішень, моделі і обчислювальні методи вдосконалення складних технічних систем [4, 6, 9, 25–27]; результати застосування методів стохастичної оптимізації для розв'язання задач вдосконалення БОК [5, 12]; модель, обчислювальний метод синтезу рішень багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації зі змішаними умовами і результати розв'язання тестових завдань (MV-задач), [7, 9, 17–22, 24]; структура комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень при формуванні образу елементів технічних систем “ROD & IDS” [6, 8, 15, 23, 25, 30, 31], форма скалярних згорток функцій вибору для багатокритеріальних задач оптимізації та прийняття рішень [28, 17].

Апробація результатів дисертації. Апробація результатів дисертаційного дослідження проводилася на засіданнях кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», на засіданнях школи-семінару кафедри теоретичної та прикладної системотехніки Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Окремі положення і висновки доповідалися на всеукраїнських і міжнародних конференціях і конгресах: міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» (м. Харків,); міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Актуальні проблеми життєдіяльності Суспільства» (м. Кременчук); міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина и космос» (м. Дніпропетровськ); науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми); міжнародна науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (м. Харків).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Обсяг загального тексту дисертації складає 159 сторінок (9,94 д.а.), з них основного тексту 115 сторінок (7,2 д.а). Робота ілюстрована 3 таблицями та 34 рисунками. Список використаних джерел містить 98 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження; описано об'єкт, предмет і методи дослідження; представлені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів; особистий внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, інформація про апробацію та публікації результатів досліджень.

У **першому розділі** представлений системний аналіз проблем дослідження і аналітичний огляд існуючих підходів, математичних моделей і обчислювальних

методів, а також інформаційних технологій оптимізації СТС, що їх реалізують, в умовах невизначеності вхідних даних.

Проведено аналіз, сформульовані класифікації математичних моделей і методів теорії взаємозамінності і стандартизації, застосованих для призначення допусків СТС. Проведено аналіз існуючих математичних моделей і обчислювальних методів, а також сучасних прикладних інформаційних технологій, які застосовуються для вдосконалення СТС в умовах невизначеності вхідних даних. Розглянуто їх переваги і недоліки.

Запропоновано системну модель процесу вдосконалення технічних систем з урахуванням стохастичної природи вхідних даних. Системна модель процесу прийняття рішень при формуванні образу функціонального елемента складної технічної системи представлена на рис. 1.

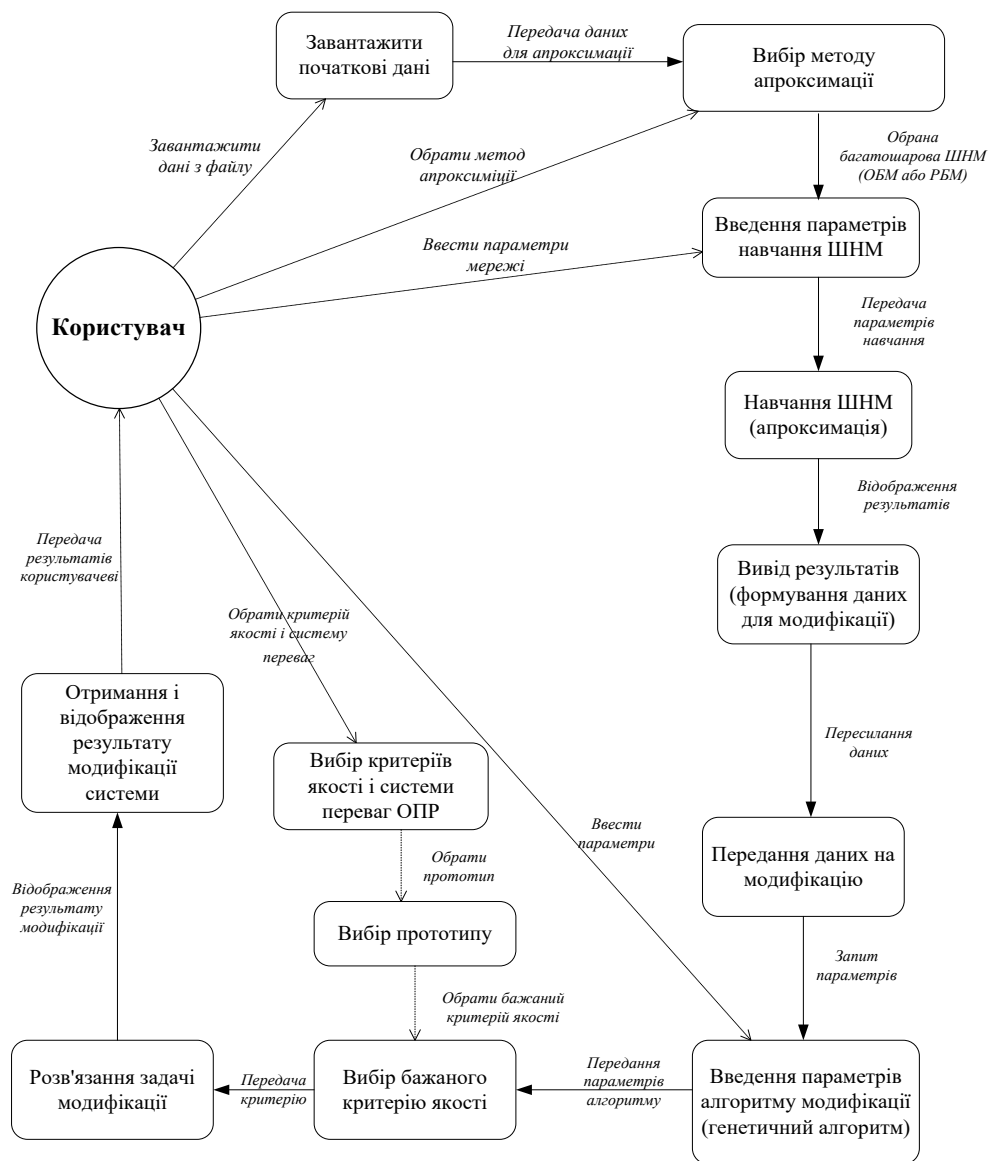


Рис. 1 Системна модель процесу прийняття рішень при формуванні образу функціонального елемента складної технічної системи

Виділено клас задач БЗСО зі змішаними умовами (в нашому випадку MV-завдання) як окремий випадок завдань типу системної оптимізації (прийняття

рішень) або зворотних крайових задач. Сформульовано їх постановки, запропонована сукупність узгоджених методів (методологія) їх вирішення.

Синтез раціональних рішень багатокритеріальних MV-завдань здійснюється шляхом створення ієрархічної дворівневої схеми синтезу рішень, що включає: побудова сурогатних моделей систем і процесів, а далі – оцінювання шуканих величин при параметричній невизначеності вхідних даних, що забезпечує підвищення ефективності прийняття рішень.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1, 3, 13, 16, 30].

У другому розділі сформульовані різні постановки БЗСО, а також описаний обчислювальний метод їх розв'язання.

Позначимо X^0 – вектор випадкових величин розмірності M (параметри моделі, керуючі змінні, змінні стану), F^0 – вектор випадкових величин розмірності I (дані вимірювань, цільові функції), величини F^0 можна знайти з використанням вихідної математичної моделі об'єкта дослідження, представленої у вигляді $F^0 = F(X^0)$, де F – вектор-функція.

Визначимо проекції X^0 і F^0 як випадкові величини з нормальним законом розподілу, задавши їх математичні очікування, середні квадратичні відхилення і кореляційні матриці. Наведені вхідні дані дозволяють перейти до подання X^0 і F^0 як систем декількох випадкових величин з багатовимірним нормальним законом розподілу.

Відповідно до концепції ступеневих середніх А. Н. Колмогорова, будемо використовувати в якості критеріїв перевірки гіпотези про рівність центрів розподілів для репрезентативних вибірок з двох багатовимірних генеральних сукупностей t – статистику Стюдента, а гіпотези про рівність коваріаційних матриць – багатовимірний аналог критерію В. І. Романовського Ro :

$$t = \sqrt{\frac{n_\alpha}{2}} MD^2, \quad (1)$$

де n_α – розмірність вибірок з генеральних сукупностей; MD – відстань Махаланобіса;

$$Ro = \frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}}, \quad k = n_\alpha - 3, \quad (2)$$

$\chi^2 = \frac{n_\alpha}{N} (\sigma^0)^T R \sigma^0$ – багатовимірний аналог критерію згоди Пірсона; N – розмірність

X^0 (або F^0); $\sigma^0 = \left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n} \right\}$, $n = 1..N$; σ_n, σ_n – середні квадратичні відхилення змінних

$x_n \in X^0$ (Індекс * – бажані значення); R – кореляційна матриця.

Визначимо логарифмічну функцію правдоподібності. Остаточний вигляд скалярної згортки цільових функцій для задач прийняття рішень з використанням (1–2) має вигляд:

$$L(X / t_F, Ro_F) = \frac{1}{2} (t_F^2 + Ro_F + t_X^2 + Ro_X) + C_L. \quad (3)$$

Надалі в якості скалярної згортки цільових функцій в MV-завданнях, вважаючи, що $R_X = R_F = E$, де R_X і R_F – кореляційні матриці, використовувалася згортка:

$$E = \frac{1}{2I} \sum_{i=1}^I \left\{ f_{fit} \left[\left(\mu_i(f_i^*) \frac{\Delta_{f_i}}{f_i^*} \right)^2 (1 + \sigma_{f_i}^0)^{-2} \right] + \beta_f \cdot f_{fit} \left(\frac{|\chi_{f_i}^2 - k|}{\sqrt{2k}} \right) \right\} + \\ + \gamma \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M \left\{ f_{fit} \left[\left(\mu_m(x_m^*) \frac{\Delta_{xm}}{x_m^*} \right)^2 (1 + \sigma_{xm}^0)^{-2} \right] + \beta_x \cdot f_{fit} \left(\frac{|\chi_{xm}^2 - k|}{\sqrt{2k}} \right) \right\}, \quad (4)$$

$$\text{де } \Delta_{f_i} = M_\alpha[f_i] - f_i^*, \quad \chi_{f_i}^2 = n_\alpha \frac{M_\alpha[(f_i - M_\alpha[f_i])^2]}{(\sigma_{f_i}^*)^2}; \quad \sigma_{f_i}^\circ = \left\{ \frac{\sigma_{f_i}}{\sigma_{f_i}^*} \right\};$$

$$\frac{|\chi_{f_i}^2 - k|}{\sqrt{2k}} = \frac{n_\alpha}{\sqrt{2(n_\alpha - 3)}} \left| (\sigma_{f_i}^\circ)^2 - 1 + \frac{3}{n_\alpha} \right|;$$

$$\Delta_{xm} = M_\alpha[x_m] - x_m^*, \quad \chi_{xm}^2 = n_\alpha \frac{M_\alpha[(x_m - M_\alpha[x_m])^2]}{(\sigma_m^*)^2}; \quad \sigma_{xm}^\circ = \left\{ \frac{\sigma_{xm}}{\sigma_{xm}^*} \right\};$$

$$\frac{|\chi_{xm}^2 - k|}{\sqrt{2k}} = \frac{n_\alpha}{\sqrt{2(n_\alpha - 3)}} \left| (\sigma_{xm}^\circ)^2 - 1 + \frac{3}{n_\alpha} \right|,$$

x_m , σ_m – значення математичного очікування і середнього квадратичного відхилення змінної x_m для прототипу;

σ_{xm} – середньоквадратичне відхилення змінної $x_m \in X^0$;

f_i , σ_{f_i} – значення математичного очікування і середнього квадратичного відхилення критеріїв вибору рішень f_i для прототипу;

σ_{f_i} – середньоквадратичне відхилення критеріїв вибору рішень $f_i \in F^0$;

f_{fit} – функція пристосованості;

$f_{fit}(d) = 1 - \exp(-C \cdot d)$, $C > 0$ (Вибирається з умови, що початкове значення $E_{av}^{(1)}$ було: $E_{av}^{(1)} < 1$), d – аргумент функції пристосованості ($d > 0$);

$\mu_i(f_i)$, $\mu_m(x_m)$ – функції приналежності;

γ – параметр регуляризації ($\gamma = 0$ – ідентифікація, $\gamma = 1$ – оптимізація);

β_f, β_x – параметри робастності.

Очевидно, що можливі й інші варіанти вибору статистик в (3), а також законів їх розподілу, в залежності від додаткової інформації та прийнятих евристик.

Методологічна цінність даної роботи полягає в тому, що синтез скалярних згорток цільових функцій формалізований, в той час як раніше, вони вводилися чисто евристично.

Уявімо завдання стохастичної оптимізації у вигляді $f(x) \rightarrow \min$, де f – цільова функція, вид якої залежить від умов даної задачі, x – випадкова величина з заданим законом розподілу. У даній роботі розглядаються змінні x з нормальним або

рівномірним законами розподілу. Однозначно визначимо змінну x , в разі нормального закону розподілу, задавши її математичне очікування $M[x] = x_c$ і дисперсію $D[x] = \sigma_x^2$. Слід зазначити, що при розгляді завдання багатопараметричної оптимізації – змінна x і визначаючі її величини x_c і σ_x є векторами, розмірність яких відповідає розмірності розв’язуваної задачі.

Внаслідок випадкової природи змінної x , цільова функція $f(x)$ також буде випадковою величиною. Для подання випадкової величини цільової функції визначимо її математичне очікування і дисперсію – $M[f(x)] = f_c$ і $D[f(x)] = \sigma_f^2$. Для обчислення ймовірності потрапляння значення цільової функції в заданий діапазон для заданих величин x_c і σ_x випадковим чином сформуємо безліч векторів $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_{n_a}\}$.

Найчастіше в вираз для цільової функції входить не одна змінна, а декілька. В такому випадку використовується скалярна «згортка» цільових функцій E .

У класі задач стохастичної оптимізації зазвичай виділяють три моделі прийняття рішень: М-задача (задача знаходження мінімального математичного очікування цільової функції), V-задача (задача знаходження мінімальної дисперсії цільової функції) і Р-задача (задача знаходження максимальної ймовірності досягнення заданої цільової функції).

Слід зазначити, що часто в задачах стохастичної оптимізації необхідно спостерігати за змінами математичного очікування і дисперсії цільової функції одночасно, не допускати перевищення ними заданих значень. Для вирішення цієї проблеми розглядаються моделі зі змішаними умовами. Окреслені умови для багатокритеріальної задачі можуть вводитися, наприклад, у вигляді скалярної згортки виду (3).

Таким чином, задача оцінювання $X = (M[X^0], \sigma_X^0)$ може бути зведена до БЗСО зі змішаними умовами (в нашому випадку MV-задачі), квазірішення якої, згідно з принципом максимуму правдоподібності (М-оцінка), є:

$$\hat{X} = \arg \inf_{\hat{X} \in D_X} E(\hat{X} / t_F, Ro_F), \quad (5)$$

де D_X – множина коректності, що визначається в загальному випадку системою переваг ОПР. В даному випадку передбачалося, що D_X є опуклою множиною.

Квазірішення поставленого завдання (нормальне розв’язання) може бути знайдено методом регуляризації.

Параметр β_p вибирався $(\beta_{p+1} = \beta_p / q, q > 1, p = 0, 1, 2, \dots)$ відповідно до узагальненого принципу нев’язки для нелінійних задач. Розглядалися екстремалі $\hat{X}_p^\circ, \hat{X}_{p+1}^\circ$ і перевірялося виконання умови:

$$|f_i(\hat{X}_p^\circ)| - C(\xi_i + h_i \|\Delta x_{m,p+1}^\circ\|) \geq 0, \quad C > 1, \quad i = 1 \dots I,$$

де ξ_i – похибка визначення f_i ,

h_i – похибка визначення f_i .

Якщо вона виконувалася, то в якості наближення до квазірішення обирали екстремалі, підпорядковані умові $|f_i(\hat{X}^\circ)| \geq C(\xi_i + h_i \|\Delta x_m^\circ\|)$. В іншому випадку екстремалі обиралися з умови $|f_i(\hat{X}^\circ)| < C(\xi_i + h_i \|\Delta x_m^\circ\|)$.

Синтез квазірішення багатокритеріальних задач модифікації в детермінованому і стохастичному (MV-задачі) формулюваннях здійснювався за допомогою еволюційного методу.

Визначимо еволюційний метод (ЕМ) як модифікацію генетичного алгоритму (ГА), зі змінюваними від епохи до епохи параметрами, для вирішення поставленого завдання. У даній роботі представлені опис ГА і елементи новизни, що відрізняють пропонований еволюційний метод від класичного ГА.

Робота генетичного алгоритму (ГА) починається із завдання обмежень на керуючі змінні, з якими маніпулює ГА. Зазвичай такі умови задаються системою нерівностей, що обмежують кожну керуючу змінну з двох сторін: $x_m' \leq x_m \leq x_m''$, $m = 1 \dots M_d$, де x_m – набір з M_d керуючих змінних; x_m' і x_m'' – їх нижні та верхні межі, відповідно. У нашому випадку обмеження задавалися у вигляді $X^\circ \in O(P, R^\circ)$, де $O(P, R^\circ)$ – еліпсоїд з центром в точці P і радіусом R° . В обмеженій таким чином області пошуку випадковим чином з рівномірним або нормальним розподілом формується початковий набір змінних. Набір змінних x_m , відповідний будь-якому рішенню, будемо називати особиною, а загальний набір особин – популяцією.

Після утворення початкової вибірки і її кодування починається робота самого ГА. В якості евристики при відборі батьківських особин був обраний метод рулетки. Даний метод дозволяє відбирати особини з кращими значеннями скалярної згортки критеріїв вибору рішень (цільових функцій) з більшою ймовірністю, ніж при рівномірній вибірці.

У даній роботі використаний дійсний оператор кросоверу, що імітує бінарний. Закон зміни параметра дійсного оператора кросоверу від номеру епохи:

$$b = 2 + 3\left(\frac{t}{T}\right)^n, \quad n \in [0, 5].$$

Як дійсний оператор мутації, використано оператор нерівномірної мутації Михалевича, що відноситься до класу нестаціонарних мутаторів. В результаті на початкових епохах ГА, виявляється близьким до оператора випадкової мутації, а на завершальних епохах, створює мутації, що забезпечують близькість значень величин $x_m^{(t)}$ і $x_m^{(t+1)}$.

Після проведення операцій кросовера і мутації відбирається найбільш пристосована особина (в разі пошуку рішень багатокритеріальних задач параметричної оптимізації (багатокритеріального прийняття рішень) – особина з найбільш підходящою скалярною згорткою критеріїв вибору рішень, яка і поміщується в набір особин для наступної епохи алгоритму.

Додатково при створенні нової популяції використовувався також елітний відбір. В даному випадку для кожної нової популяції відбиралися з попередньої популяції особини, у яких скалярна згортка критеріїв вибору рішень E була менше деякого порогового значення $E < E_c$, де E_c – середнє значення скалярної згортки

критеріїв вибору рішень популяції для поточної епохи. Елітний відбір сприяє швидкій збіжності алгоритму.

Епохи повторюються до тих пір, поки не буде виконана умова зупинки. Даною умовою може служити або виконання максимально допустимої кількості епох T , або відсутність змін, із заданою похибкою скалярної згортки критеріїв вибору рішень, в популяції протягом певної кількості епох. На останній епосі вибиралася особина, для якої скалярна згортка критеріїв вибору рішень мінімальна.

Особливістю класичного ГА є швидка збіжність на перших декількох епохах, і, в той же час, невисока точність знаходження екстремуму для складних критеріїв вибору рішень. Одним із засобів підвищення швидкості збіжності ГА є, як відомо, кластеризація. Для підвищення швидкості збіжності та точності знаходження екстремуму був розроблений метод звужуючих околиць (Decremental Neighborhood Method), який реалізує ідеї кластеризації. Суть цього методу полягає в наступному. Спочатку відбувається запуск ГА з рівномірним розподілом початкової популяції по всій області пошуку $[x'_m, x''_m]$. Отримуємо особину з найкращою для даних налаштувань ГА скалярною згорткою критеріїв вибору рішень. Знайдений $\hat{x}^\circ$ екстремум використовується далі як центр нової області визначення керуючих змінних методу. Область визначення наступної епохи ГА задаємо у вигляді:

$$D_x = [k_x x'_m + (1 - k_x) \hat{x}_m, k_x x''_m + (1 - k_x) \hat{x}_m],$$

де k_x – параметр релаксації.

Число особин (в подальшому – число міні-популяцій) для наступної епохи і параметр релаксації вибираються за формулами: $k_x = \exp(-\alpha \frac{t}{T})$, $\alpha \leq 1$, відповідно.

Таким чином, послідовно проводиться запуск ЕМ з: областю визначення керуючих змінних, що зменшується; числом особин (міні-популяцій); параметром релаксації; параметром функції пристосованості, що збільшується, до тих пір, поки не буде виконана умова зупинки.

Для розв'язання задачі оптимізації або модифікації в стохастичному формулюванні необхідно розраховувати математичне очікування і середньоквадратичне відхилення цільової функції. Запропоновано наступний підхід: оскільки заздалегідь відсутня інформація про параметри розподілу випадкової величини цільової функції, то для їх визначення для кожного набору керуючих змінних x_m формується вибірка по нормальному закону розподілу (міні-популяція) із заданим математичним очікуванням x_{mc} і середнім квадратичним відхиленням σ_m . Далі, на основі сформованої вибірки розраховується множина значень цільової функції, по якій, в свою чергу, розраховуються математичне очікування і середньоквадратичне відхилення цільової функції. Причому, чим більший обсяг вибірки, тим точніше будуть розраховані ці величини. У той же час необхідно мінімізувати розмір такої вибірки, оскільки навіть одиничний розрахунок цільової функції може вимагати значних обчислювальних ресурсів. Проведено аналіз залежності точності розрахунку цільової функції від обсягу вибірки. Раціональною є вибірка (міні-популяція) обсягом в 30–100 особин, оскільки подальше збільшення вибірки не призводить до підвищення точності розрахунку параметрів вибірки.

В роботі розглянуто приклади розв'язання тестових завдань в детермінованому і стохастичному формулюваннях. Були обрані тестові функції, на базі яких були проведені розрахункові дослідження: функція Розенброка і функція Растрігіна. Отже доведено, що спільне використання в розробленому обчислювальному методі: ЕМ зі змінюємими від епохи до епохи параметрами: операторів дійсного кодування, функції пристосованості та релаксації; числом особин (числом міні-популяцій) і методу звужуючих околиць – забезпечує зниження інформаційної та тимчасової складності пропонованого методу, в порівнянні з класичним ГА, не менше ніж в декілька разів.

Таким чином, розроблено математичну модель і ЕМ розв'язання нелінійних БЗСО в різних формулюваннях.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [4, 7, 9, 15, 18–22, 24, 28, 29].

У третьому розділі наведені системні моделі інформаційно-аналітичного забезпечення процесу прийняття рішень ОПР при формуванні образу СТС в умовах невизначеності вхідних даних на основі вихідних математичних моделей.

Сформовано системні алгоритмічні моделі розв'язання завдань БЗСО зі змішаними умовами. Наведено декомпозицію алгоритмічних моделей з виділенням компонентів функціонального і системного наповнення (ФН, СН) та підкомпонентів – базисних завдань ФН. Розроблено структурно-функціональні схеми і архітектуру інтерактивної КСППР в умовах невизначеності вхідних даних для синтезу рішень БЗСО зі змішаними умовами. Розроблено інтерактивну КСППР "ROD & IDS[®]", що реалізує описану системну модель.

Метод робастного оптимального проєктування включає розв'язання оберненої і прямої нелінійних задач розрахунку конструкторських розмірних ланцюгів.

На першому етапі для прототипу знаходиться розв'язання оберненої задачі розрахунку конструкторських розмірних ланцюгів (Монте-Карло аналіз): оцінка довірчих інтервалів величин цільових функцій при заданих довірчих інтервалах величин керуючих змінних підсистем (функціональних елементів).

Синтез квазірішення цієї задачі здійснюється регуляризацією пошуку мінімуму згладжуючого функціоналу в формі скалярної згортки цільових функцій (4) з $\beta_f = 0$. На основі отриманих результатів може бути проведений порівняльний аналіз різних технологій виготовлення систем.

На другому етапі здійснюється синтез квазірішення модифікації в детермінованому і стохастичному (MV-задачі) формулюваннях методом регуляризації. В якості згладжуючого функціоналу використовувалася скалярна згортка цільових функцій в формі (4). Застосовувався обчислювальний метод, в якому реалізовано спільне використання еволюційного методу зі змінними від епохи до епохи параметрами: операторів дійсного кодування, функції пристосованості та релаксації, а також методу звужуючих околиць. Застосування запропонованих розробок забезпечує ефективне робастне оцінювання шуканих величин при параметричній невизначеності вхідних даних і зниження інформаційної складності методу синтезу квазірішень.

Таким чином, еволюційним методом знаходиться розв’язання прямої задачі розрахунку конструкторських розмірних ланцюгів: за заданими значеннями математичних очікувань і довірчих інтервалів величин цільових функцій або фазових змінним розглянутих систем (підсистем) або процесів знаходяться математичні очікування і довірчі інтервали величин керуючих змінних підсистем (функціональних елементів). Розроблені системні моделі інформаційно-аналітичного забезпечення процесу прийняття рішень ОПР, а також інтерактивної КСППР (рис. 2), що їх реалізує, при вдосконаленні об’єктів авіаційної техніки в умовах невизначеності вхідних даних на основі вихідних математичних моделей.

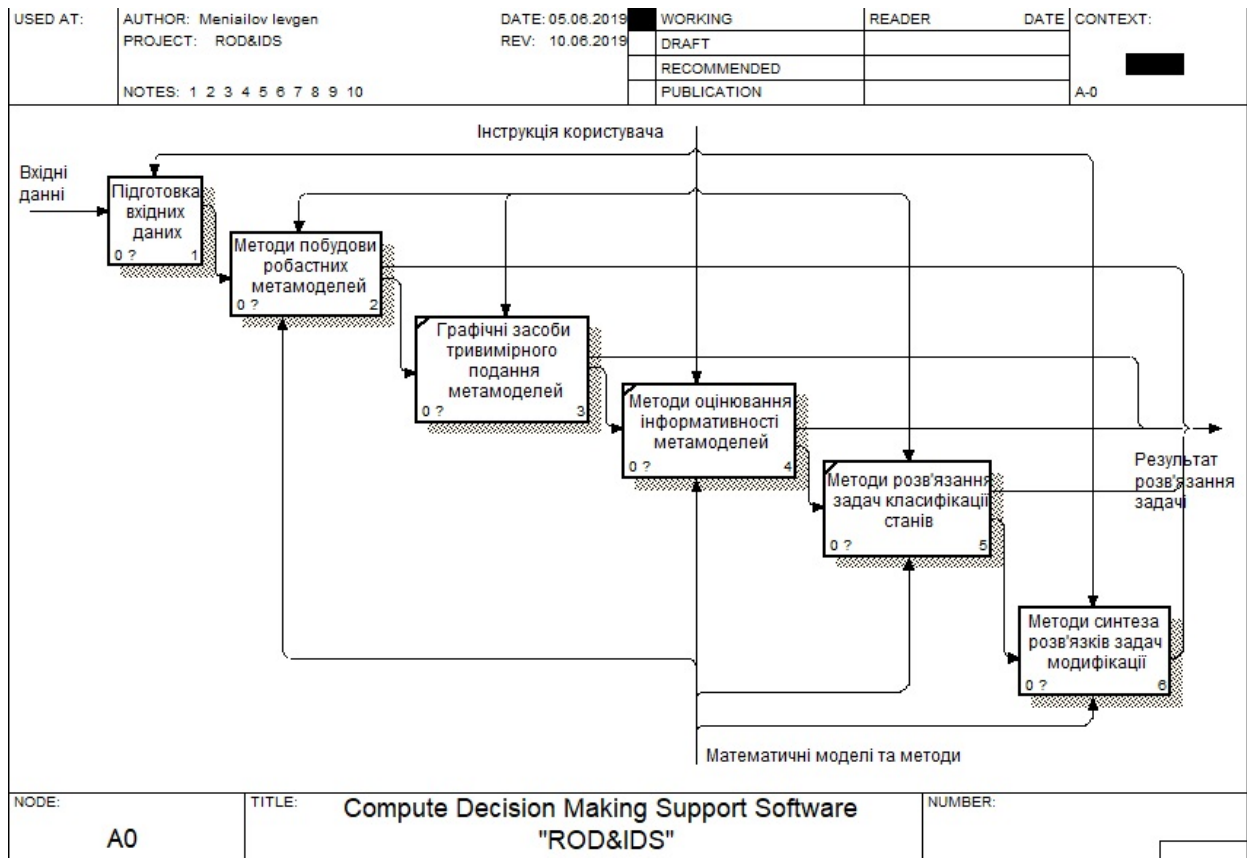


Рис. 2 Діаграма декомпозиції інтерактивної комп’ютерної системи підтримки прийняття рішень “ROD & IDS”

Основні результати розділу опубліковані в роботах [6, 8, 12, 17, 23, 25, 26, 30, 31].

У четвертому розділі описані результати практичної перевірки достовірності запропонованих математичних моделей, методів і можливості застосування КСППР, на їх основі, при розв’язанні БЗСО зі змішаними умовами для авіаційних двигунів, на прикладі: ТРДД, радіального вентилятора із загнутими назад лопатками робочого колеса і визначення закону регулювання спрямляючими апаратами БОК ТРД.

Як перший приклад, розглянемо робастне оптимальне проєктування БОК ТРДД. Пошук максимуму ККД БОК проводився при зміні проточної частини на периферії (6 змінних), кутів установки (4 змінні), вхідних і вихідних геометричних кутів (8 змінних), густоти решіток профілів (4 змінні) для лопаткових вінців

першого і другого ступенів. Для вхідного направляючого апарату змінювалася тільки проточна частина. Пробна вибірка сформована шляхом зміни радіуса проточної частини – в межах ± 2 мм, геометричних кутів вінців в межах ± 2 градуси, густоти лопаткових вінців в межах $\pm 5\%$. Для адекватного опису впливу варійованих параметрів на характеристику ступенів використана апроксимація напірних гілок від кордону зриву до кордону замикання. Розрахунок витрат повітря від зриву до замикання виконаний з використанням спеціального макросу програми Axial. Таким чином, було обрано таку кількість контрольованих змінних стану: геометричних параметрів – 22, режимних (витрата повітря) – 1, обсяг пробної вибірки склав 450 точок.

В якості цільових функцій при оптимізації були обрані:

- α_{out} – кут потоку на виході;
- π^* – ступінь підвищення повного тиску компресора на розрахунковій витраті повітря;
- η^* – адіабатичний ККД, який визначається за повними параметрами, на розрахунковій витраті повітря;
- π_{stall}^* – ступінь підвищення повного тиску на кордоні зриву;
- G_{choke} – витрата замикання;
- formparameter – параметр форми поверхні відгуку, що відповідає обраній цільовій функції на розрахунковому значенні витрати повітря.

В якості метамоделей розглянутих систем в подальшому використовувалися робастні нейромережеві моделі в формі радіально-базисних штучних нейронних мереж.

Оптимізація проводилася на розрахунковій витраті повітря в детермінованому формулюванні.

Результати розрахунків в детермінованому формулюванні представлені на рис. 3 і в табл. 1, де $G^\circ = G / G_{p,0}$, $\pi^\circ = \pi^* / \pi_{p,0}^*$, $\eta^\circ = \eta^* / \eta_{p,0}^*$, $\Delta\eta^* = \eta^* - \eta_{p,0}^*$ – зміна ККД в порівнянні з прототипом на розрахунковій витраті повітря, ΔK_y – запас стійкості.

Перше детерміноване формулювання завдання оптимізації обрано так, щоб забезпечити максимальний рівень ККД на розрахунковій витраті повітря при необхідному рівні ступеня підвищення повного тиску (результати_МС_2 (v.2.1)). Друге завдання оптимізації виконано з метою перевірки того, наскільки можна варіювати обмеженнями в задачі оптимізації (результати_МС_2 (v.4.4)) – отримати більший максимум ККД в поєднанні з більш крутим, ніж у прототипу, протіканням напірної гілки. Таким чином, на прикладі двоступеневого осьового компресору показано можливість отримання геометрії вінців, яка забезпечує ті вимоги, що пред'являє інженер-конструктор до характеристик компресора.

Як другий приклад, розглянемо робастне оптимальне проектування радіального вентилятора з загнутими назад лопатками робочого колеса в умовах стохастичною природи вхідних даних. Вхідними даними є безліч альтернатив – 16 варіантів аналогів. Чи задавалися значення геометричних параметрів вентилятора: густота решітки ($x_1 = \tau$), відносна увігнутість профілю ($x_2 = \bar{f}$), безрозмірна хорда профілю ($x_3 = \bar{l}$), безрозмірний діаметр входу решітки ($x_4 = \bar{D}_1$).

В якості критерію вибору рішень (цілових функцій) задавалися: безрозмірні параметри витрати ($f_1 = \bar{c}_{2r}^* = \frac{\varphi^*}{4b_2}$) І повного тиску ($f_2 = 0.5\psi^* = \bar{c}_{2u}^* \cdot \eta_g$) для режиму максимального ККД, де $\bar{c}_{2r}^*$ – коефіцієнт витрат, $\bar{c}_{2u}^*$ – відносна величина окружної складової абсолютної швидкості на виході, φ^* – коефіцієнт продуктивності, ψ^* – коефіцієнт повного тиску, $\bar{b}_2$ – відносна ширина колеса на виході, η_g – гідравлічний ККД робочого колеса.

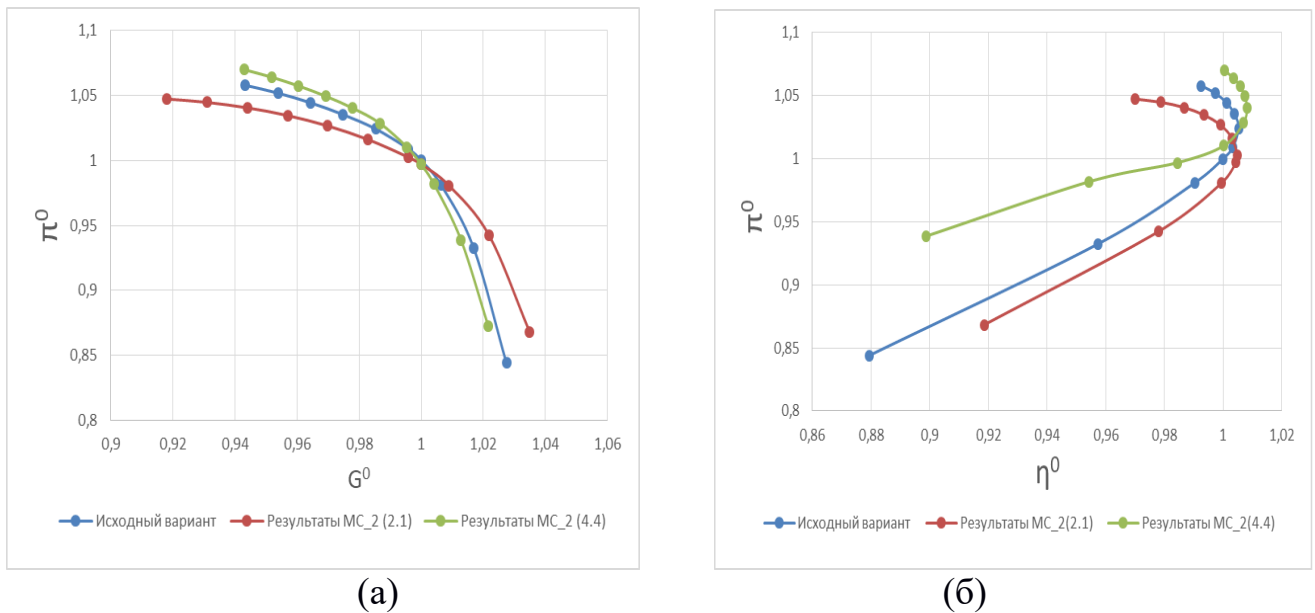


Рис. 3 Характеристики прототипу і оптимальних варіантів компресорів:
(а) – залежність $[G^\circ, \pi^\circ]$, (б) – залежність $[\pi^\circ, \eta^\circ]$

Таблиця 1

Порівняння значень цільових функцій для варіантів компресорів.

Величини / Варіанти	$\Delta \eta^*_{\text{р}}, \%$	$\Delta \eta^*_{\text{max}}, \%$	$\Delta K_{\text{г}}, \%$
прототип	0	0.494	12.157
результати_MC_2 (v.2.1)	<u>0.406</u>	0.449	<u>14.444</u>
результати_MC_2 (v.4.4)	-1.448	<u>0.756</u>	<u>13.80</u>

В якості метамоделей розглянутих систем в подальшому використовувалися робастні нейромережеві моделі в формі радіально-базисних ШНС.

Дані прототипу – відомі номінальні значення і їх довірчі інтервали, які наведені в таблиці 2. Як бажаних критеріїв вибору рішень (цілових функцій) були прийняті номінальні значення і їх довірчі інтервали: параметр витрати $f_1 = 0.1900 \pm 0.0040$, параметр повного тиску $f_2 = 0.6200 \pm 0.0114$.

Загальні результати синтезу рішень задач модифікації в детермінованому і стохастичному (значення математичних очікувань і їх довірчих інтервалів) формулюваннях представлені в табл. 2. На основі порівняння результатів обчислень можна сформулювати наступні висновки:

– максимальне відхилення номінальних значень шуканих величин, отриманих розв’язання задач в різних формулюваннях, досягає до 3–18%;

– оцінки шуканих величин, отримані в результаті розв’язання задачі модифікації в стохастичному формулюванні, є ефективними і стабільними (робастностними), тому що було досягнуто зниження довірчих інтервалів для критеріїв вибору рішень у 1.8–3.6 рази в порівнянні з результатами в детермінованому формулюванні, при незначній зміні довірчих інтервалів для шуканих величин.

Таблиця 2

Загальні результати обчислень

Вхідні дані	Прототип	Детерміноване формулювання	Стохастичне формулювання
x_1	2.7450 0.0142	2.2946	2.6298 0.0157
x_2	0.1410 0.0008	0.1409	0.1194 0.0009
x_3	0.4600 0.0024	0.4601	0.3754 0.0026
x_4	0.2800 0.0037	0.4867	0.4713 0.0035
f_1	0.2390 0.0120*	0.2391 0.0141*	0.2398 0.0078
f_2	0.5050 0.0115*	0.5600 0.0264*	0.5576 0.0073

* – результати розв’язання оберненої задачі розрахунку конструкторських розмірних ланцюгів

Таким чином, отримані результати розв’язання задачі робастного оптимального проектування радіального вентилятора із загнутими назад лопатками робочого колеса в умовах стохастичної природи вхідних даних.

У серійному виробництві в зв’язку з наявністю допусків при виготовленні неможливо дотримуватися обраних кутів установки поворотних лопаток спрямляючих апаратів (СА) з абсолютною точністю, що може привести до погіршення роботи БОК. У зв’язку з цим було сформульовано завдання знаходження закону регулювання з лінійним законом залежності між кутами установки лопаток СА як БЗСО зі змішаними умовами: вибрати такий закон регулювання поворотними лопатками СА – знайти величини математичних очікувань і середніх квадратичних відхилень кутів установки лопаток СА, при яких математичні очікування і середні квадратичні відхилення інтегральних характеристик уздовж лінії робочих режимів при заданих запасах газодинамічної стійкості Δk_y БОК дорівнювали б бажаним. В якості інтегральних характеристик БОК розглядалися ККД η_k^* , Ступінь підвищення тиску π_k^* . В якості структури була обрана залежність кутів установки лопаток СА, представлена наступною формулою – $\Delta v_i = a_i + b_i(1 - \bar{n})$, де Δv_i – зміна кута установки лопаток i -го СА БОК, a_i і b_i – параметри закону регулювання СА, $\bar{n}$ – відносна приведена швидкість обертання валу компресору. В даному випадку можна забезпечити регулювання поворотними лопатками СА БОК за допомогою всього лише одного керуючого приводу. На рис. 4 і рис. 5 показані закони регулювання у вигляді залежностей кутів повороту лопаток СА Δv_i від відносної приведеної швидкості обертання валу компресора $\bar{n}$, які отримані в різних формулюваннях задачі.

Виходячи з середніх квадратичних відхилень кутів установки вхідного і напрямних апаратів перших чотирьох ступенів БОК двигуна $\sigma_v^* = 0.15$ град. отримано, що максимальні середні квадратичні відхилення ступеня підвищення тиску можуть досягати значення $\sigma_\pi = 0.34$, що є великою величиною, при середніх квадратичних відхиленнях ККД $\sigma_\eta \leq 0.0013$. Розв'язана задача про призначення допусків на кути установки вінців компресора двигуна в цілях забезпечення заданих довірчих інтервалів за інтегральними характеристиками БОК. При середніх квадратичних відхиленнях кутів установки вхідного і СА перших чотирьох ступенів БОК двигуна $\sigma_v \leq 0.050$ град. на режимах $\bar{n} = [0.85 \dots 1.00]$ можуть бути забезпечені наступні значення середніх квадратичних відхилень сумарних характеристик БОК: $\sigma_\pi \leq 0.15$, $\sigma_\eta \leq 0.002$ з ймовірністю $P^* = 0.99$.

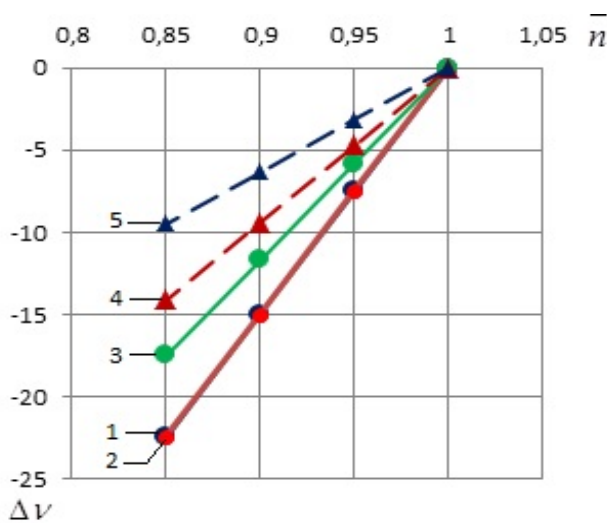


Рис. 4 Вихідний закон регулювання кутами установки лопаток СА

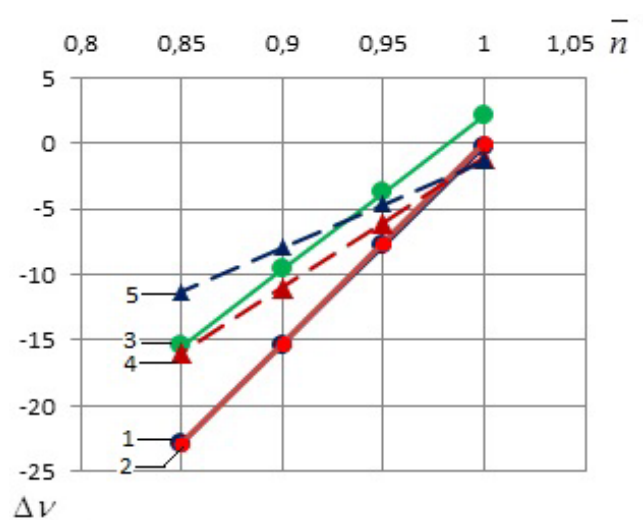


Рис. 5 Закон регулювання з лінійним законом залежності між кутами установки лопаток СА в стохастичному формулюванні

Таким чином, розроблені науково-практичні рекомендації до застосування розроблених математичних моделей, обчислювальних методів, КСППР, що їх реалізують, інформаційних технологій оптимізації СТС в умовах невизначеності вхідних даних в практиці автоматизованого проєктування і доведення ТРД, ТРДД і їх підсистем на підприємствах Міністерства промислової політики України.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1, 2, 9, 5, 10, 11, 15, 27, 29].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримані науково обґрунтовані результати, які вирішують важливе наукове завдання, яке полягає в розробці математичних моделей, обчислювальних методів і комп'ютерних систем, що їх реалізують, для вдосконалення технічних систем на прикладі об'єктів авіаційної техніки в умовах невизначеності вхідних даних.

Отримано нові наукові і практичні результати роботи, що мають істотні переваги перед існуючими рішеннями, сформульовані висновки, які полягають у наступному.

1. Проведено аналіз і сформовані класифікації сучасних математичних моделей, обчислювальних методів і прикладних інформаційних технологій, що їх реалізують, які використовуються при вдосконаленні об'єктів авіаційної техніки в умовах невизначеності вхідних даних. На його основі виявлено мету і завдання дисертаційного дослідження, підходи до вирішення поставленого загального завдання, що дозволило формалізувати процес пошуку раціональних проектних рішень і структурувати завдання агрегування застосовуваних для поставленої мети методів в єдину методологію модифікації СТС в умовах невизначеності вхідних даних.

2. У роботі вперше розроблено системну математичну модель синтезу раціональних проектних рішень завдань стохастичної модифікації СТС, яка має багатокритеріальне уявлення, яка системно структурована і забезпечує в умовах невизначеності вхідних даних можливість отримання стабільних оцінок шуканих змінних із досяжною з практичної точки зору точністю.

3. Вдосконалено еволюційний метод вирішення нелінійних БЗСО, заснований на принципах систем штучного інтелекту, в якому на відміну від існуючих синтез квазірішення при наявності обмежень на клас допустимих рішень здійснюється регуляризацією пошуку мінімуму згладжуючого функціоналу в відповідності до методу А. Н. Тихонова з застосуванням процедури адаптації при виборі параметрів еволюційного методу в процесі пошуку рішень.

Розроблений ЕМ розв'язання задач модифікації СТС в умовах невизначеності вхідних даних слід вважати високоефективним, оскільки його застосування, в тому числі процедури адаптації від епохи до епохи при виборі параметрів релаксації і функції пристосованості ЕМ, і методу звужуючих околиць забезпечують зниження не менш ніж на 30% часової складності розробленого методу пошуку оптимального розв'язання в порівнянні з існуючими ГА.

4. Отримала подальший розвиток теорія побудови комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень на основі запропонованих математичних моделей і методів для розв'язання задачі в стохастичному формулюванні завдань вдосконалення СТС, застосування якої дозволяє забезпечити підвищення ефективності процесів пошуку раціональних проектних рішень на етапах розробки, модифікації та доведення СТС.

Сформульовано принципи створення, склад, структуру інтерактивної КСППР "ROD & IDS" при формуванні образу підсистем і елементів авіаційної техніки на основі вихідних математичних моделей. Розроблена інтерактивна КСППР

застосовувалася для вирішення поставлених завдань і орієнтована на широке коло користувачів, що працюють над проблемами вдосконалення об'єктів авіаційної техніки.

5. Достовірність запропонованих математичних моделей, обчислювальних методів, алгоритмів і програмного забезпечення, що їх реалізує, а також отриманих з їх допомогою наукових положень, результатів розрахункових досліджень, висновків і рекомендацій підтверджена практично при вирішенні багатокритеріальних задач вдосконалення об'єктів авіаційної техніки в умовах невизначеності вхідних даних.

6. Наукові положення, висновки, пропозиції та рекомендації, а також результати розрахункових досліджень прийняті для реалізації в навчальний процес, а також в практику проектування турбореактивних двигунів на підприємстві АТ «Мотор Січ».

Застосування на практиці розробленої комп'ютерної інтерактивної КСППР дозволяє істотно скоротити терміни і матеріальні витрати при створенні виробів та охорону навколишнього середовища (за рахунок зменшення кількості браку при серійному виробництві), що знижує вартість і підвищує конкурентоспроможність вітчизняних авіаційних систем, наприклад, турбореактивних двигунів і турбоустановок.

Таким чином, була досягнута мета дослідження, яка полягає у підвищенні ефективності процесів пошуку раціональних проєктних рішень при вдосконаленні технічних систем на прикладі об'єктів авіаційної техніки за рахунок розробки математичних моделей, обчислювальних методів і комп'ютерних систем, що їх реалізують, в умовах невизначеності вхідних даних, висока ефективність яких обґрунтована теоретично і підтверджена практично.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Меньяйлов Е. С., Трончук А. А., Угрюмова К. М., Басов Ю. Ф., Меньяйлов А. В. Метод определения закона регулирования поворотными направляющими аппаратами многоступенчатого осевого компрессора в условиях неопределенности входных данных. *Авиационно-космическая техника и технология*. Харьков, 2013. № 10 (107). С. 101–106.

Особистий внесок: застосування еволюційного методу для розв'язання завдання визначення закону регулювання поворотними спрямляючими апаратами багатоступінчастого осьового компресору.

2. Меньяйлов Е. С., Угрюмова К. М., Трончук А. А., Черныш С. В. Формирование облика технических систем в условиях неопределенности входных данных на основе методов искусственного интеллекта. *Авиационно-космическая техника и технология*. Харків, 2014. № 7 (114). С. 169–174. (*Index Copernicus*).

Особистий внесок: участь у розробці моделей і методів інформаційної технології для вирішення завдань вдосконалення складних технічних систем.

3. Меняйлов Е. С. Обзор и анализ существующих модификаций генетических алгоритмов. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков, 2015. № 70. С. 244–254. (*Index Copernicus*).

4. Меняйлов Е. С., Угрюмова Е. М., Черныш С. В., Мазурков А. П., Угрюмов М. Л., Хусточка А. Н. Применение методов вычислительного интеллекта для решения прямых задач расчета конструкторских размерных цепей в условиях параметрической априорной неопределенности. *Авиационно-космическая техника и технология*. Харьков, 2017. № 7 (142). С. 123–129. (*Index Copernicus*).

Особистий внесок: розв'язання задачі робастного оптимального проектування радіального вентилятору із загнутими назад лопатками робочого колеса в умовах стохастичної природи вхідних даних.

5. Меняйлов Е. С., Угрюмов М. Л., Черныш С. В., Меняйлов А. В. Методология робастного оптимального проектирования многоступенчатого осевого компрессора на основе дискретных данных об аналогах. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Серия *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. Харьков, 2018. № 13 (1289). С. 66–71. (*Index Copernicus*).

Особистий внесок: результати застосування методів стохастичної оптимізації для розв'язання задач вдосконалення БОК.

6. Меняйлов Е. С., Безлюбченко А. В., Угрюмов М. Л., Черныш С. В. Модели и методы информационной технологии робастного оптимального проектирования технических систем. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков, 2018. № 79. С. 117–131. (*Index Copernicus*).

Особистий внесок: системна модель процесу прийняття рішень при формуванні образу функціонального елемента складної технічної системи, огляд інформаційних технологій для вирішення задач вдосконалення складних технічних систем.

7. Угрюмов М. Л., Меняйлов Е. С., Черныш С. В., Старцева А. В., Безлюбченко А. В. Метод синтеза решений многокритериальных задач стохастической оптимизации со смешанными условиями. *Вестник Харьковского национального университета*. Серия «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». Харьков, 2018. Выпуск 39. С. 14–25.

Особистий внесок: розробка моделі та обчислювального методу синтезу рішень багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації зі змішаними умовами і результати розв'язання тестових завдань (MV-задач)

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз:

8. Bazilevych K., Mazorchuk M., Parfeniuk Y., Dobriak V., Meniailov Ie., Chumachenko D. Stochastic modelling of cash flow for personal insurance fund using the cloud data storage. *International Journal of Computing*. 2018. № 3 (17). P. 153–162. (*Scopus*).

Особистий внесок: участь у розробці комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень в умовах стохастичної невизначеності.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у зарубіжних спеціалізованих виданнях:

9. Meniaïlov I., Khustochka O., Ugryumova K., Chernysh S., Yepifanov S., Ugryumov M. Mathematical Models and Methods of Effective Estimation in Multi-objective Optimization Problems Under Uncertainties. In: Schumacher A., Vietor T., Fiebig S., Bletzinger KU., Maute K. (eds) *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization*. Springer, Cham, 2018. P. 411–427.

Особистий внесок: запропоновано еволюційний метод, на основі генетичного алгоритму для синтезу рішень багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Меньайлов Е. С. Метод выбора параметров узлов ГТД в условиях неопределенности входных данных. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ-2012 : всеукр. наук.-практ. конф.*, 17 листоп. 2012 р. : тези доп. Харків, 2012. Т. 2. С. 87.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

11. Meniaïlov E. S. Application of evolutionary methods to the solution of a turbojet engines compressors optimization tasks. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ-2013 : всеукр. наук.-практ. конф.*, 23 листоп. 2013 р. : тези доп. Харків, 2013. Т. 2. С. 132.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

12. Меньайлов Е. С. Формирование облика технических систем в условиях неопределенности. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства : матеріали ХХІ міжнар. наук.-практ. конф.*, 24–25 квітн. 2014 р., Кременчук, 2014. С. 89.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

13. Меньайлов Е. С. Применение эволюционных методов при формировании облика технических систем. *Людина і космос : ХVІ міжнар. наук.-практ. конф.*, 9–11 квітн. 2014 р. : тези доп. Дніпропетровськ, 2014. С. 238.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

14. Меньайлов Е. С. Стрелец В. Е. Формирование облика технических систем в условиях неопределенности входных данных с использованием методов искусственного интеллекта. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ-2014 : всеукр. наук.-практ. конф.*, 22 листоп. 2014 р. : тези доп. Харків, 2014. Т. 2. С. 101.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

15. Меньайлов Е. С. Метод стохастической аппроксимации для идентификации нейросетевых моделей. *Інформатика, математика, автоматика. ІМА::2015 : матеріали наук.-техн. конф.*, 20–25 квітн. 2015 р. Суми, 2015. С. 268.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

16. Меньяйлов Е. С. Анализ основных направлений повышения эффективности генетических алгоритмов. *«Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 165-річчю Софії Василівни Ковалевської* : матеріали всеукр. наук. конф., 22–25 вер. 2015 р. Кременчук, 2015. С. 69–70.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

17. Меньяйлов Е. С. Скалярные свертки функций выбора в многокритериальных задачах стохастической оптимизации при априорной неопределенности данных. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ-2015* : всеукр. наук.-практ. конф., 21 листоп. 2015 р. : тези доп. Харків, 2015. Т. 2. С. 90.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

18. Меньяйлов Е. С., Старцева А. В., Гайденок О. А. Математические модели и популяционный метод решения многокритериальных задач стохастической оптимизации. *Інформатика та системні науки. ІСН-2016* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф., 10–12 бер. 2016 р. Полтава. 2016. С. 198–200.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

19. Меньяйлов Е. С., Старцева А. В., Черныш С. В., Заярный А. В. Применение методов вычислительного интеллекта для решения многокритериальных задач робастного оптимального проектирования систем. *Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях* : труды междунар. науч.-техн. конф., 26–31 травн. 2016 р. Харків, 2016. С. 227–230.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

20. Меньяйлов Е. С., Старцева А. В., Базилевич К. А. Математическая модель и вычислительный метод решения задач стохастической оптимизации. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ-2016* : всеукр. наук.-практ. конф., 26 листоп. 2016 р. : тези доп. Харків, 2016. Т. 2. С. 143–145.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

21. Меньяйлов Е. С. Черныш С. В. Математические модели и методы синтеза решений многокритериальных задач робастного оптимального проектирования и диагностирования систем. *Сучасні інформаційні технології* : матеріали засідань школи-семінару за 2016–2017 навч. рік. Харків, 2017. С. 15–20.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

22. Меньяйлов Е. С., Безлюбенко А. В., Старцева А. В. Метод решения нелинейной задачи расчета конструкторских размерных сетей в условиях параметрической априорной неопределенности. *Інформатика та системні науки. ІСН-2017* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф., 16–18 бер. 2017 р. Полтава. 2017. С. 196–198.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

23. Меньяйлов Е. С., Старцева А. В., Заярный А. В., Черныш С. В. Применение методов вычислительного интеллекта для решения задач робастного оптимального проектирования и интеллектуального диагностирования систем и процессов. *Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*.

ComInt-2017 : матеріали IX міжнар. наук.-практ. конф., 16–18 трав. 2017 р. Київ, 2017. С. 268–269.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

24. Угрюмов М. Л., Меньяйлов Е. С., Черныш С. В., Безлюбченко А. В., Угрюмова Е. М. Метод синтеза решений многокритериальных задач стохастической оптимизации со смешанными условиями. *дискретных особенностей в задачах математической физики, МДОЗМФ-2107* : труды XVIII междунар. науч.-техн. конф., 26–28 черв. 2017 р. Харків, 2017. С. 218–220.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

25. Меньяйлов Е. С., Перец И. С., Базилевич К. А. Информационная технология решения задач формирования облика сложных технических систем. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ-2017* : всеукр. наук.-практ. конф., 18 листоп. 2017 р., тези доп. Харків, 2017. Т. 2. С. 135–136.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

26. Меньяйлов Е. С., Черныш С. В., Перец И. С., Безлюбченко А. В. Информационная технология робастного оптимального проектирования «Concept_Pro_St®». *Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів і аналітиків комп'ютерних систем «ProfIT Conference»* : матеріали І всеукр. наук.-практ. конф., 24–26 квітн. 2018 р. Харків, 2018. С. 59.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

27. Красильникова Е. И., Меньяйлов Е. С. Применение пробных выборок в задачах оптимизации. *Международная научно-техническая конференция «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях»* : труды междунар. науч.-техн. конф., 23–25 травн. 2018 р. Харків, 2018. С. 146–147.

Форма участі: очна, доповідь на конференції.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

28. Ugryumova K. M., Chernysh S. V., Meniaailov Ie. S. Ugryumov M. L. A method synthesis of selection function scalar convolutions for the multi-objective decision-making problems. Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University. Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems». Kharkiv, 2015. Issue 27. P. 172–180.

Особистий внесок: участь у розробці скалярних згорток функцій вибору для багатокритеріальних задач оптимізації та прийняття рішень.

29. Горячая В. А., Меньяйлов Е. С., Угрюмов М. Л., Черныш С. В., Угрюмова Е. М., Стрелец В. Е. Системы и методы принятия решений в задачах диагностирования динамических систем с учётом стохастической природы входных данных : учеб. пособие по лаб. практикуму. Харків, 2016.— 107 с.

Особистий внесок: постановка задачі стохастичної оптимізації, застосування еволюційного методу для розв'язання задач визначення закону регулювання поворотними поворотними спрямляючими апаратами багатоступінчастого осьового компресору з урахуванням стохастичної природи вхідних даних.

30. Меньяйлов Є. С., Угрюмова К. М., Трончук О. А., Черниш С. В., Лисенко О. О. Комп'ютерна програма «Компьютерная интерактивная система поддержки принятия решений при формировании облика сложных технических систем "Concept Pro St" в условиях стохастической природы входных данных» : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 59589. Дата реєстрації 12.05.2015. *Офіційний бюллетень. Держ. служба. інтел. власності України*. Київ, 2015. № 37. С. 202.

Особистий внесок: розробка та вдосконалення основних алгоритмів, розробка структури і логіки роботи програми, програмування основних модулів, тестування.

31. Угрюмов М. Л., Меньяйлов Є. С., Черниш С. В., Угрюмова К. М. Комп'ютерна програма «Методи нелінійного оцінювання в багатокритеріальних задачах робастного оптимального проектування та діагностування систем в умовах параметричної апіорної невизначеності (методологія, методи, методики і реалізують їх комп'ютерні системи підтримки і прийняття рішень)» (“ROD & IDS”) : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 82875. Дата реєстрації 14.11.2018. *Офіційний бюллетень. Держ. служба. інтел. власності України*. Київ, 2018. № 51. С. 236.

Особистий внесок: розробка та вдосконалення основних алгоритмів, розробка структури і логіки роботи програми, програмування основних модулів, тестування.

АНОТАЦІЯ

Меньяйлов Є. С. Математичні моделі і методи розв'язання задач вдосконалення технічних систем в умовах невизначеності вхідних даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2021.

Дисертацію присвячено задачі підвищення ефективності процесів пошуку раціональних проектних рішень при вдосконаленні технічних систем на прикладі вдосконалення об'єктів авіаційної техніки за рахунок досягнення при виготовленні в серії заданих інтегральних критеріїв якості та допусків на їх відхилення в умовах невизначеності вхідних даних. Розроблено системну математичну модель, яка має багатокритеріальне уявлення, що дозволяє забезпечити в умовах невизначеності вхідних даних можливість отримання стабільних оцінок шуканих змінних з досяжною з практичної точки зору точністю. Розроблено метод синтезу скалярних згорток функцій вибору для багатокритеріальних задач прийняття рішень. Розроблено метод розв'язання задачі стохастичної оптимізації зі змішаними умовами, в якому на відміну від існуючих синтез квазірішення при наявності

обмежень на клас допустимих рішень здійснюється регуляризацією пошуку мінімуму згладжуючого функціоналу в відповідності до методу А. Н. Тихонова з застосуванням процедури адаптації при виборі параметрів еволюційного методу в процесі пошуку рішень. Сформульовано принципи створення, склад, структуру інтерактивної комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень. Основні результати роботи набули промислового застосування при системному вдосконаленні об'єктів авіаційної техніки.

Ключові слова: математичне моделювання, обчислювальні методи, прийняття рішень, стохастична оптимізація, еволюційні методи.

ABSTRACT

Menyailov Ie. S. Mathematical models and methods for solving problems of improvement of technical systems under conditions of uncertainty of input data. – Qualification scientific work is as a manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Science, Speciality 01.05.02 – Mathematical Modeling and Computational Methods. – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2021.

In the dissertation thesis, the tasks of increasing the efficiency of the search processes for rational design solutions when improving technical systems are considered by the example of aviation facilities through the development of mathematical models, computational methods and computer systems that implement them under conditions of uncertainty in input data.

To achieve this goal, the following tasks were formulated and solved under the dissertation research: the analysis of existing mathematical models and computational methods, as well as modern applied information technologies used to improve complex technical systems in conditions of uncertainty of initial data has been provided; a system model of the process of improving technical systems has been developed, taking into account the stochastic nature of the input data; mathematical models and methods for solving nonlinear multicriteria problems of stochastic optimization have been created: a method for synthesizing scalar convolutions of choice functions for multicriteria decision-making problems, a method for synthesizing quasi-solutions of nonlinear multicriteria problems of system modification, a method for solving a stochastic optimization problem with mixed conditions; the composition and structure of an interactive computer system for decision support making for the improvement of aviation facilities in conditions of uncertainty of initial data has been developed; the results of the dissertation research have been implemented into the practice of solving problems of improving complex technical systems by examples of improving the subsystems of turbojet engines and turbojet bypass engines; scientific and practical recommendations on the use of the developed computer decision support system and the results of the research carried out in the practice of computer-aided design of aircraft engine subsystems at the enterprises of the Ministry of Industrial Policy of Ukraine have been developed.

The object of the research is the processes of improving complex technical systems under conditions of a priori uncertainty of input data.

The subject of the research is mathematical models and computational methods for finding rational solutions to multicriteria problems of improving complex technical systems in deterministic and stochastic formulations.

In the dissertation research, when formalizing the representation of the research object, structuring mathematical models and computational methods for solving multicriteria problems of stochastic optimization of complex technical systems, the methods of system analysis and decision theory were used. When developing a method for solving the problem of assigning tolerances to the parameters of complex technical systems, the approaches and methods of the theory of interchangeability and standardization, the theory of probability, and mathematical statistics were used. During the development of computational methods and algorithms for finding quasi-solutions to problems of multicriteria problems of stochastic optimization of complex technical systems, the methods of the theory of inverse problems and mathematical programming were used. When constructing a computational method for solving multicriteria stochastic optimization problems, models and methods of the theory of artificial intelligence were used (evolutionary methods, the method of narrowing neighborhoods). During synthesizing the composition and structure of applied software, theories of formal and algorithmic systems, as well as modern technologies for creating computer programs were used.

Key words: mathematical modeling, computational methods, decision making, stochastic optimization, evolutionary methods.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1.8. Тир. 100 прим. Зам. 293-14.
Підписано до друку 05.03.2021 р. Папір офсетний

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 578-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.