

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Єнчева Сергія Васильовича**  
**на тему «Синтез інтелектуальних систем керування авіаційними**  
**газотурбінними двигунами», подану на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**  
**зі спеціальності 05.05.03- двигуни та енергетичні установки**

**1. Актуальність теми дослідження**

Наразі завдання синтезу систем автоматичного керування (САК) авіаційними газотурбінними двигунами (ГТД) характеризується переходом до концепції інтелектуального керування. Це пов'язано, насамперед, з неперервним ускладненням об'єктів керування – авіаційних ГТД, які є складними динамічними об'єктами, що відрізняються різноманітністю фізичних процесів, багатовимірністю, нелінійністю, нестаціонарністю робочих процесів, суттєвим впливом режимів роботи і зовнішніх умов на характеристики їх функціонування, а також з появою нових класів більш потужних обчислювальних засобів на борту літака, а також з підвищенням вимог до надійності та ефективності процесів керування в умовах невизначеності.

Дисертаційна робота присвячена створенню науково-методичного апарату для вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності функціонування систем автоматичного керування авіаційними ГТД на основі застосування інтелектуальних методів керування складними об'єктами та обробки інформації.

Роботу виконано відповідно до Стратегії відродження українського авіабудування на період до 2022р., затвердженої Кабінетом Міністрів України 10.05.2018р.

Метою дослідження є створення науково-методичного апарату для вирішення актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення газодинамічної стійкості та ефективності компресорів газотурбінних двигунів шляхом газодинамічного управління течією в компресорі на підставі результатів виконаних теоретичних та розрахунково-експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішувалися такі наукові завдання:

1. Аналіз принципів побудови, функцій, задач, методів і алгоритмів синтезу інтелектуальних систем керування авіаційними газотурбінними двигунами.

2. Вивчення структури та інформаційних потоків в електронних системах керування авіаційними ГТД, створення комплексу методик і алгоритмів ідентифікації авіаційних ГТД й обробки інформації в САК ГТД на основі методів інтелектуального керування.

3. Встановлення науково-методичних основ щодо проектування нейромережових регуляторів у структурах інтелектуальних систем керування

(ІСК) авіаційними ГТД: навчання, алгоритми синтезу та налаштування; формування структури ІСК ГТД та інтелектуального вейвлет-фільтру.

4. Створення методики синтезу нечітких ІСК ГТД за допомогою методу гармонічної лінеаризації та алгоритмічного забезпечення її функціонування.

5. Розробка методу та методик оптимізації законів керування в ІСК ГТД у процесі експлуатації на сталих та перехідних режимах за обраними критеріями: швидкодія, мінімальна витрата палива.

6. Розробка та дослідження алгоритмів забезпечення відмовостійкості інтелектуальних систем керування авіаційними ГТД з використанням нечітких і нейромережових моделей їх елементів.

## **2. Новизна результатів, їх ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій**

У дисертації та авторефераті досить чітко сформульована актуальність, наукова новизна та практична цінність виконаних досліджень.

**Наукова новизна отриманих автором результатів полягає у наступному.**

1. Створено науково-методичний апарат для вирішення науково-технічної проблеми обробки інформації в електронних системах керування авіаційними ГТД як комплексу методик й алгоритмів ідентифікації авіаційних ГТД й обробки інформації в САК ГТД на основі методів інтелектуального керування.

2. Розвинено науково-прикладне застосування теорії нейромережових регуляторів у структурах ІСК авіаційними ГТД та одержано чисельні дані щодо ефективності їх роботи шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання в середовищі MatLab/Simulink. Запропонований алгоритм структурного синтезу нейромережового регулятора ІСК ГТД дозволяє обґрунтовано обирати клас одно- чи багатовимірних структур мінімальної складності.

3. Розроблено науково-методичні основи синтезу інтелектуальних систем керування авіаційними ГТД з нечіткими регуляторами на базі комбінації методу гармонічної лінеаризації та чисельних методів.

4. Створено метод оптимізації керування авіаційним ГТД за заданими критеріями і розроблено методику розрахунку функції цілі в ІСК ГТД у процесі експлуатації на сталих та перехідних режимах за обраними критеріями оптимальності (швидкодія, мінімальна витрата палива).

5. Розроблено алгоритми забезпечення відмовостійкості інтелектуальних систем керування авіаційними ГТД з використанням нечітких на нейромережових моделях їх елементів, які відрізняються тим, що виявлення відмов у системі здійснюється шляхом порівняння елементів ІСК ГТД з аналогічними виходами елементів еталонної нейромережової моделі САК або нечіткої експертної бази знань, налаштовуваної в режимі реального часу, що дозволяє підвищити оперативність і достовірність встановлення відмов у широкому діапазоні зміни роботи та характеристик ІСК ГТД.

**Достовірність отриманих наукових результатів роботи отриманих наукових результатів роботи забезпечується коректним застосуванням**

апробованого математичного апарату для поставлених наукових завдань, а також результатами імітаційного комп'ютерного моделювання.

### **3. Найсуттєвіші наукові результати**

Запропоновано концепцію оптимізації інтелектуальних САК ГТД, керувальна частина якої являє собою єдиний математичний оператор, що перетворює вхідну інформацію в управляючі впливи. Запропоновано та обґрунтовано структуру локального критерію оптимальності, що являє собою суму квадратів прогнозних відхилень регульованих двигунових параметрів від заданих значень

Створено методику синтезу відмовостійких ІСК ГТД, та на її основі розроблено алгоритми забезпечення відмовостійкості інтелектуальних систем керування авіаційними ГТД з використанням нечітких на нейромережевих моделей їх елементів, які відрізняються тим, що виявлення відмов у системі здійснюється шляхом порівняння елементів ІСК ГТД з аналогічними виходами елементів еталонної нейромережевої моделі САК або нечіткої експертної бази знань, яка налаштовується у режимі реального часу, що дозволяє підвищити оперативність і достовірність встановлення відмов у широкому діапазоні зміни роботи та характеристик ІСК ГТД.

### **4. Повнота викладу в опублікованих працях та апробація**

Основні результати дисертації представлено у 2 колективних монографіях, 1 науковій статті у закордонному журналі, 37 наукових статтях, опублікованих у журналах, що входять до переліку фахових видань України з технічних наук, у тому числі 28 статей індексовані в міжнародних наукометричних базах Index Copernicus, Cite Factor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar, 36 тезах і матеріалах конференцій.

Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали позитивну оцінку на наукових семінарах, Міжнародному конгресі двигунобудівників, Всесвітньому конгресі «Aviation in the XXI-st century», Міжнародних науково-технічних конференціях.

### **5. Значення отриманих результатів для науки та практики**

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що застосування в практиці створення САК ГТД запропонованого науково-методичного апарату щодо синтезу інтелектуальних систем керування авіаційними ГТД дозволяє з нових позицій забезпечувати ефективність вирішення задач керування, оптимізації, діагностування та відмовостійкості авіаційних ГТД.

Практичне значення роботи підтверджується актами реалізації результатів, одержаних у дисертаційному дослідженні, у практиці підприємств ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» і ДП «Завод 410 ЦА» від 15.09.2020 р., а також актом про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчально-виховний процес Національного авіаційного університету.

## **6. Оцінка змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу та шести розділів.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі дослідження, охарактеризовані наукова новизна, теоретична й практична цінність отриманих наукових результатів, визначено особистий внесок здобувача в одержані результати досліджень та впровадження результатів роботи.

**У першому розділі** здійснено аналіз сучасного стану наукових досліджень у галузі синтезу інтелектуальних систем керування авіаційними газотурбінними двигунами.

Визначено динаміку зміни визначальних параметрів авіаційних двигунів за останні 60 років. Проаналізовано основні засоби штучного інтелекту: нейронні мережі, продукційні правила, еволюційні (генетичні) алгоритми, об'єктно-орієнтовані, логічні та об'єктно-логічні. Проаналізовано наявні моделі ГТД та їх зв'язок за рівнями невизначеності (недостатності знань). Встановлено, що моделі, які використовуються та розробляються в роботі, функціонують на середньому та достатньо високому рівні невизначеності.

У результаті дослідження визначено, що застосування інтелектуальних технологій для підвищення ефективності функціонування САК ГТД є актуальним. Встановлено, що є потреба в здійсненні комплексної автоматизації та інтелектуалізації процесів керування, оптимізації та забезпечення відмовостійкості у САК ГТД. З'ясовано, що багато питань, пов'язаних із відпрацюванням ефективних методів керування і діагностики САК ГТД, розробкою інженерних методик проектування НМ-моделей, алгоритмів керування на основі інтелектуальних технологій, залишаються неопрацьованими та малодослідженими.

**У другому розділі** розглядається запропонована проф. Валєєвим С. С. та розвинена у роботі, узагальнена модель ІСК ГТД, яка представлена у вигляді трирівневої ієрархічної структури, що дозволяє забезпечити гнучке та оперативне вирішення задач керування ГТД при внутрішніх і зовнішніх впливах для реалізації основної мети - забезпечення максимальної інформаційної пропускну здатності за умови високого рівня завад. У результаті аналізу структури та інформаційних потоків у сучасних електронних системах автоматичного керування ГТД встановлено, що основними їхніми недоліками є невисока надійність та недостатня гнучкість законів керування для забезпечення оптимальних значень вихідних параметрів ГТД, близьких до оптимальних при зміні великого числа зовнішніх дій та внутрішніх параметрів двигуна.

Визначено, що пріоритетними напрямками для побудови інтелектуальних САК ГТД є системи з нейронними та нечіткими регуляторами, а для аналізу інформації важливим є метод вейвлет-аналізу.

Для задач синтезу ІСК ГТД створено методику ідентифікації НМ-моделі ГТД. Ідентифікація ГТД за допомогою нейронних мереж полягає в побудові оптимальної нейромережевої моделі за результатами спостережень над вхідними та вихідними змінними ГТД. Для підтвердження теоретичних положень розглядаються дві тестові задачі.



**У третьому розділі** досліджено методи навчання і синтезу НМР для задач проектування нейромережових ІСК ГТД. Розроблено алгоритм синтезу НМР САК ГТД на основі принципу мінімальної складності структури нейронної мережі та врахування вимог до астатизму, фізичної реалізованості, стійкості та якості перехідних процесів у замкненій САК ГТД. Запропоновано алгоритм ініціалізації НМ на основі аналізу лінеаризованої моделі першого наближення НМ-регулятора, застосування якого дозволяє гарантувати збіжність процесу навчання параметрів НМ і зменшити похибку навчання порівняно з процедурою випадкового вибору початкових параметрів НМ більше ніж у 2 рази. Дослідження ефективності використання різних алгоритмів навчання НМ-регуляторів показало перевагу методу симплексного пошуку. Результати синтезу та моделювання ІСК ГТД з НМ-регуляторами виявили ефективність застосування НМ у задачах керування авіаційними двигунами, зокрема зменшення часу регулювання порівняно з ПІ-регулятором у 2 рази.

**У четвертому розділі** сформульовано основні теоретичні положення щодо застосування нечіткої логіки, що забезпечує новий підхід до синтезу САК ГТД, що дає можливість вирішення широкого кола проблем в умовах невизначеності, коли дані, цілі та обмеження є складними або недостатньо визначеними й не піддаються точному математичному опису. Встановлено, що нечіткий регулятор як єдиний нелінійний елемент при використанні числових методів інтегрування може бути гармонічно лінеаризований, а це дозволяє проводити дослідження періодичних коливань у нечітких САК. Визначено необхідні та достатні умови стійкості періодичних рухів для нечітких САК ГТД. На основі теоретичних досліджень синтезовано нечіткі алгоритми керування гвинтовентилятором ТГВД. Показано перспективність синтезу нечітких САК для ГТД, які суттєво розширюють діапазон якісного керування в каналах регулювання частотою обертання, синхрофазуванням і тягою гвинтовентиляторів.

**У п'ятому розділі** з позицій системного підходу запропоновано концепцію оптимізації інтелектуальних САК ГТД, керувальна частина якої являє собою єдиний математичний оператор, що перетворює вхідну інформацію в управляючі впливи. Завдання оптимального управління авіаційного ГТД зводиться до послідовності вирішення задач квадратичного програмування в реальному масштабі часу.

Під час вибору методу розв'язання задачі взято до уваги такі фактори:

- забезпечення монотонності перехідних процесів;
- витрати обчислювальної потужності на вирішення завдання;
- точність отриманого рішення і виконання обмежень;
- працездатність при короткочасних збоях обчислювального процесу.

З огляду на обсяг обчислень у роботі використано метод спряжених градієнтів. Досягнення в процесі керування одним із регулювальних органів (наприклад, реактивним соплом) своїх фізичних упорів враховуються зміною системи обмежувальних нерівностей.

На основі сформульованих теоретичних положень розроблено оптимальну ІСК турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою із

впливом за витратою палива і площі критичного перерізу сопла на сталих режимах роботи, яка забезпечує монотонність перехідних процесів, оптимальність за швидкодією. Застосування синтезованої системи управління дозволило збільшити коефіцієнти підсилення в 1,5 рази за частотою обертання ротора низького тиску і в 1,2 рази за температурою газу за турбіною низького тиску. Визначено закони керування турбогвинтовентиляторного двигуна, оптимальних за критерієм мінімальної питомої витрати палива. На крейсерському режимі польоту підвищення економічності склало 2,3 %.

**У шостому розділі** вирішується наукова задача щодо забезпечення відмовостійкості ІСК ГТД. У загальному випадку відмовостійкість САК ГТД досягається виконанням трьох дій: виявленням відмови, її діагностуванням та відновленням. У роботі розглядається підхід для забезпечення надійності та відмовостійкості ІСК ГТД, який базується на парадигмі навчання, адаптації до внутрішніх і зовнішніх факторів; реконфігурацій каналів керування (характері взаємодії локальних регуляторів) на основі принципу мінімальної складності. Розроблено методику синтезу відмовостійкої ІСК ГТД.

Запропоновано вирішення задачі синтезу алгоритмів відмовостійкого керування ІСК ГТД на основі нечіткої логіки та нейронних мереж. На основі апарату нечіткої логіки вирішено задачу реалізацію FDI-методу (Fault Detection and Identification), заснованого на порівнянні результатів вимірювань газодинамічних параметрів реального ГТД з розрахунковими параметрами, обчисленими за його математичною моделлю.

Сформована база нечітких правил на основі діагностичної матриці та база нечітких експертних правил.

Розроблено структуру інтелектуальної САК ГТД з нейронною мережею, що складається з нейромережевої моделі цифрової частини САК ГТД; нейромережевої моделі ГТД з датчиками та інформаційно-вимірювальними системами; нейромережевої моделі виконавчих механізмів.

Блок діагностування відмов побудований на базі нейромережевого класифікатора. Вхідними сигналами для блоку діагностування є:  $\Delta \epsilon$  - нев'язка за сигналом керування;  $\Delta u$  - нев'язка вихідного сигналу нейромережевого регулятора САК ГТД;  $\Delta y$  - нев'язка сигналів датчиків двигуна. Вихідним сигналом нейромережевого класифікатора є вектор  $F_1, \dots, F_N$ , елементи якого приймають значення 0 або 1.

Змодельовано перехідні процеси в САК ГТД за різних типів відмов датчиків: коротке замикання; обрив; параметрична відмова; коротке замикання на вході в регулятор. Нейромережевий класифікатор забезпечує розпізнавання відмов датчиків і цифрового регулятора.

## **7. Дискусійні положення та зауваження до дисертації**

1. У першому розділі дисертаційної роботи автор вказує, поміж інших, на доцільність використання генетичних алгоритмів у інтелектуальних системах керування ГТД, проте в подальшому в роботі їх не застосовує.



2. Варто було розглянути комбіновані методи інтелектуального керування, які суттєво розширили можливості інтелектуального керування.

3. Розглянуті приклади нейромережевої ідентифікації елементів ГТД стосуються їх окремих характеристик. Виникає питання, чи можливо взагалі побудувати всережимну багатозв'язну нейромережеву модель ГТД?

4. У п'ятому розділі доцільно було в якості критерію оптимізації обрати квадратичний критерій з ваговими коефіцієнтами.

5. У роботі не розкрито алгоритм навчання нейронної мережі за допомогою оптимізатора (розділ 5).

### Висновок

Висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Єнчева С.В.

У цілому можна констатувати, що дисертаційна робота Єнчева С.В. є закінченим науковим дослідженням, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати. На базі узагальнення результатів теоретичних та розрахунково-експериментальних досліджень створено науково-методичного апарату для вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності функціонування систем автоматичного керування авіаційними ГТД на основі застосування інтелектуальних методів керування складними об'єктами та обробки інформації.

Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН України. Автореферат відповідає змісту дисертації.

Зважаючи на актуальність теми досліджень Єнчева С.В., ступінь обґрунтованості наукових результатів роботи, новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях автора, вважаю, що дисертація Єнчева Сергія Васильовича на тему «Синтез інтелектуальних систем керування авіаційними газотурбінними двигунами» відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами та доповненнями згідно Постанов КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016), що висувається до дисертації, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.05.03- двигуни та енергетичні установки.

Офіційний опонент

Доктор технічних наук, професор,

Заслужений діяч науки і техніки України,

лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,

професор кафедри телекомунікацій, Інституту телекомунікаційних систем,

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

« 07 » 12 2020 р.

