

ВІДГУК

опонента, доктора технічних наук, професора,

РУСИНА БОГДАНА ПАВЛОВИЧА,

на дисертацію Влодова Сергія Ігоровича за темою:

«Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем»

Актуальність теми дисертації

У дисертаційній роботі вирішується науково-прикладна проблема розроблення математичного і програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією газотурбінних двигунів (ГТД) вертольотів в умовах льотної експлуатації задля підтримки безпеки польотів вертольотів у реальному часі. Її актуальність не викликає сумнівів – розвиток авіаційних технологій вимагає постійного удосконалення систем моніторингу, що забезпечують безпеку польотів, адже ГТД вертольотів працюють у складних, багатопараметричних і нелінійних режимах, що ускладнює своєчасне виявлення дефектів. Існуючі системи часто мають закриту архітектуру та обмежені можливості адаптації, що призводить до високих витрат на обслуговування та підвищує ризики аварійних ситуацій. Використання нейромережових технологій для розробки математичних моделей і програмного забезпечення моніторингу дозволяє значно підвищити точність, оперативність і ефективність діагностики технічного стану двигунів, що є критично важливим для забезпечення безпеки експлуатації вертольотів у сучасних умовах авіації.

Можна зробити висновок, що актуальність дисертації, що полягає у вирішенні важливої науково-прикладної проблеми розроблення математичного і програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів в умовах льотної експлуатації задля підтримки безпеки польотів вертольотів у реальному часі.

Мета і завдання дисертації

Мета дисертації Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» полягає у розробленні математичного і програмного забезпечення моніторингу технічного стану і управління експлуатацією ГТД вертольотів в умовах льотної експлуатації задля підтримки безпеки польотів вертольотів у реальному часі за невизначеності впливаючих чинників задля запобігання їх виходу на критичний режим.

У рамках дисертації вирішено ключові завдання, спрямовані на створення сучасної системи моніторингу експлуатації ГТД вертольотів. Основні завдання включають аналіз специфіки побудови математичного та

програмного забезпечення для розробки архітектури експертної системи моніторингу у льотних умовах, а також розробку методу формування нейромережевої моделі процесів класифікації, контролю, діагностики, прогнозування, налагодження та тренд-аналізу параметрів двигуна. Це дозволило удосконалити підходи до вирішення прикладних задач моніторингу та забезпечити ефективну інтеграцію системи у сучасні авіаційні процеси.

Остаточним етапом є створення прототипу бортової експертної системи моніторингу з подальшою оцінкою ефективності розробленого математичного та програмного забезпечення, а також отримання рекомендацій для прийняття рішень в умовах неповноти та невизначеності інформації. Проведення апробації отриманих результатів у режимі льотної експлуатації демонструє здатність системи забезпечувати високий рівень управління, своєчасне реагування на можливі відхилення в роботі двигуна та запобігання переходу двигуна в критичний режим.

Наукова новизна результатів роботи

Наукова новизна отриманих автором результатів не викликане сумнівів і полягає у такому:

1. Уперше запропоновано метод побудови програмної системи моніторингу і управління експлуатацією технічного стану ГТД вертольотів у режимі льотної експлуатації вертольоту, яка, на відміну від існуючих, дозволяє підвищити рівень автоматизації, оперативності та достовірності моніторингу і управління їх технічним станом.

2. Удосконалено методи класифікації, контролю, діагностики, прогнозування, налагодження, тренд-аналізу технічного стану ГТД вертольотів на основі модифікованих алгоритмів навчання і архітектур нейронних мереж, в яких, на відміну від існуючих, застосовано гібридні комбінації адаптивних елементів, що дозволили підвищити точність розв'язку прикладних задач моніторингу.

3. Удосконалено модель триканальної автоматизованої підсистеми управління (АПУ) для побудови архітектури експертної системи, в яку, на відміну від існуючих, введено канал управління частотою обертів ротора вільної турбіни та програмні модулі адаптивного управління шляхом відокремлення параметрів двигуна та агрегату дозування палива, що дозволило покращити показники якості каналів управління.

4. Удосконалено нейромережеві моделі програмних модулів експертної системи, в яких, на відміну від існуючих, застосовано розроблені методи організації ефективних обчислень прикладних задач моніторингу, що дозволяє підвищити ефективність моніторингу їх основних вузлів двигуна в режимі експлуатації.

5. Набули подальшого розвитку нейро-нечіткі методи моніторингу, в яких, на відміну від існуючих, застосовано гібридні нейро-нечіткі класифікатори з еволюційною діагностичною матрицею з модернізованими нечіткими правилами, що дало змогу підвищити впевненість прийняття рішень

щодо наявності дефектів й підвищити точність отримання основних параметрів робочого процесу двигуна в умовах неоднозначності.

6. Набули подальшого розвитку методи відновлення інформації за відмови штатних сенсорів, які відрізняються від існуючих тим, що за рахунок байєсової нейронної мережі, навчання автоасоціативної нейронної мережі на площині помилок та рекурентної нейронної мережі алгоритмом багатовимірної фільтра Калмана з поліномом Чебишева, дозволяє зменшити похибку реконструкції значень параметрів двигуна.

Практична цінність результатів роботи

1. Розроблено алгоритм формування однорідної і репрезентативної навчальної і тестової вибірок на основі масиву даних реєстрованих на борту термогазодинамічних параметрів двигуна, застосування якого в нейромережеві моделі дозволив збільшити достовірність визначення можливості здійснення польоту на рівні 99 %.

2. Удосконалено алгоритми навчання і архітектур нейронних мереж, що забезпечило середню точність розв'язання прикладних задач моніторингу на рівні 99,5 %.

3. Розроблено програмне забезпечення «MONITOR» v. 0.1, що здійснює обчислення параметрів, застосування якого надало можливості обчислювати та передбачати розвиток сценаріїв польотних ситуацій у випадку виникнення непередбачуваних обставин, зумовленими технічним станом двигуна.

4. Створено прототип бортової експертної системи моніторингу, використання якої дозволяє збільшити якість прийняття рішення щодо можливості експлуатації двигуна до 99,2 %.

5. За результатами експериментального дослідження в умовах ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» та військової частини 2269 Національної гвардії України Міністерства внутрішніх справ України встановлено, що застосування розробленого математичного і програмного забезпечення у складі експертної системи дозволило збільшити на 20 % якість прийняття рішення щодо здійснення польоту порівняно із традиційними статистичними критеріями.

6. Результати роботи апробовані та впроваджені в ТОВ «ЕЙР ТАУРУС», у військову частину 2269 Національної гвардії України Міністерства внутрішніх справ України у вигляді бортової системи моніторингу авіаційних двигунів, що застосовуються на вертольотах державної авіації України, а також в Департаменті авіаційної безпеки Міністерства внутрішніх справ України у вигляді інтелектуальної системи моделювання системи підтримки прийняття рішень командиром екіпажу повітряного судна (вертольоту). Результати роботи впроваджені в освітній процес таких закладів вищої освіти: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; Харківський національний університет радіоелектроніки; Льотна академія Національного авіаційного університету; Національний університет «Львівська Політехніка»; Кременчуцький національний університет імені

Михайла Остроградського; Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи є достатнім, що підтверджується проведенням комплексних досліджень із застосуванням відомих теоретичних і експериментальних методів, достовірність яких забезпечується результатами математичного моделювання, експериментів та апробацією в умовах ТОВ «ЕЙР ТАУРУС». У роботі застосовано системний підхід, який включає аналіз існуючих рішень і методів обробки даних, визначення вимог до моніторингу ГТД вертольотів і розробку математичного та програмного забезпечення. Застосування нейромережевих технологій дозволило вдосконалити методи класифікації, ідентифікації, контролю, діагностики, прогнозування та аналізу трендів параметрів ГТД вертольотів, а методи нечіткої логіки й нейро-нечітких мереж забезпечили адаптивність і стабільність підсистеми управління двигунів за умов змінних експлуатаційних параметрів. Методи системного аналізу використані для проектування бортової нейромережевої експертної системи, а методи штучного інтелекту та об'єктно-орієнтованого програмування забезпечили програмну реалізацію розроблених моделей і методів для вирішення прикладних задач моніторингу, що підвищило їх ефективність.

Висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані коректністю постановки та розв'язання задач досліджень, застосуванням загальновідомих положень фундаментальних законів термодинаміки, а також теорії системного аналізу та нейронних мереж. Достовірність результатів, отриманих аналітичними методами, підтверджується результатами математичного моделювання, чисельного аналізу, експериментальних досліджень і апробацією в реальних умовах, що демонструє адекватність запропонованих моделей і методів до задач моніторингу та управління ГТД вертольотів.

Повнота викладу основних результатів дисертації

Основні положення та результати дисертації опубліковані у 90 наукових працях, з них: 3 монографії (1 – за кордоном), 52 наукових статей у зарубіжних виданнях, що мають індексацію у наукометричній базі Scopus, 19 наукових статей у наукових виданнях, включених до категорії «Б» Переліку фахових видань України та включених до міжнародних наукометричних баз даних (Google Scholar, «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography» тощо), 13 тезах доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, що мають індексацію у наукометричній базі Scopus, 2 свідоцтвах про реєстрацію авторського права на твір, 1 патенті України на корисну модель.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 515 сторінок друкованого тексту, із них 336 сторінок основного тексту, містить 183 рисунків, 13 таблиць, 548 найменувань у списку літературних джерел на 58 сторінках і 7 додатків на 95 сторінках.

У *першому розділі* проведено загальну характеристику проблематики розроблення математичного та програмного забезпечення для моніторингу і управління експлуатацією газотурбінних двигунів вертольотів, де визначено основні недоліки сучасних систем, зокрема їх відокремлене функціонування, відсутність єдиного банку даних для випробувань, неструктурованість і надлишковість різнорідних даних, а також обмежені можливості підтримки прийняття рішень при аварійних ситуаціях. За допомогою моделі двигуна у вигляді «чорного ящика» обґрунтовано необхідність вирішення завдання моніторингу на теоретико-множинному рівні через розв'язання низки підзадач, що включають застосування сучасних математичних методів та алгоритмів обробки даних, спрямованих на підвищення оперативності, точності та ефективності діагностики технічного стану двигунів.

У *другому розділі* розроблено метод побудови нейромережевої моделі моніторингу ГТД вертольотів, що базується на алгоритмі формування однорідної та репрезентативної навчальної і тестової вибірок. Розглянуто етапи створення критеріїв та метрик для оцінки ефективності моніторингу, обґрунтовано вибір архітектури нейронної мережі та алгоритмів її навчання, що дозволяють значно підвищити точність визначення технічного стану двигуна. Проведено аналіз експериментальних даних, зокрема кластеризацію вихідних вибірок, що засвідчує їх репрезентативність, що є критично важливим для подальшої діагностики та прогнозування стану ГТД вертольотів у режимі льотної експлуатації.

У *третьому розділі* розроблено та апробовано низку нейромережевих методів для класифікації, контролю, діагностики, прогнозування, налагодження та тренд-аналізу технічного стану ГТД вертольотів, що базуються на модифікованих алгоритмах навчання та сучасних архітектурах нейронних мереж. Створено математичне і програмне забезпечення для ідентифікації параметрів двигуна в умовах динамічних режимів роботи (зокрема, при запуску і прийомистості), що дозволяє точно моделювати перехідні процеси та своєчасно виявляти відхилення. Використано модифікації нейронної мережі Елмана із динамічною стековою пам'яттю, а також адаптовані LSTM-моделі для забезпечення контролю з похибкою менше 1 %, що сприяє високій точності прогнозування. Крім того, розроблено нейромережевий класифікатор на базі ансамблю РБФ-мереж, персептрона та мережі Кохонена для розпізнавання дефектів проточної частини двигуна, що дозволило оптимізувати процес прийняття рішень щодо експлуатації та діагностики технічного стану, підтверджуючи ефективність запропонованих підходів у реальних умовах польотної експлуатації.

Четвертий розділ присвячено створенню автоматизованої підсистеми управління ГТД вертольотів, що відзначається інноваційним підходом до розділення класичної системи керування на окремі ланки – сам двигун та агрегат дозування палива (АДП). Така модифікація враховує практично одночасний характер перехідних процесів як в агрегаті дозування палива, так і в самому двигуні, що дозволяє точніше формувати системну помилку, яка потім подається на регулятор для генерування коригувального сигналу. Підсистема управління інтегрує основні елементи – елемент порівняння (ЕП), регулятор, АДП та ГТД вертольоту, що забезпечує адаптивне керування параметрами двигуна за допомогою моделі триканальної АПУ, у якій окремо реалізовано контроль частоти обертів ротора вільної турбіни та параметрів двигуна.

У п'ятому розділі розвинено підхід моніторингу технічного стану ГТД вертольотів, що ґрунтується на застосуванні математичного апарату нечіткої логіки та нечітких експертних систем; для діагностики створено універсальну діагностичну матрицю, де перший стовпець містить імітовані дефекти, а параметри, отримані за допомогою компонентної математичної моделі, використовуються для формування бази експертних знань на основі функцій приналежності лінгвістичних змінних, що дозволяє модифікувати модель вирішального правила шляхом точнішого градуювання шкал «Придатний стан двигунів» та «Дефектний стан двигунів»; на підставі цих розробок створено модель нечіткої експертної системи моніторингу, що використовує нечітку нейронну мережу Ванга-Менделя, основу на системі нечіткого висновку за моделлю Такагі-Сугено-Канга, що забезпечує можливість практичної реалізації системи на борту вертольотів.

У шостому розділі представлено розробку прототипу бортової експертної системи моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів, що інтегрує нейромережеві підходи, нечіткі методи та алгоритми багатокритеріальної оптимізації для підтримки прийняття рішень в умовах неповноти та невизначеності інформації. Розглянуто архітектуру системи, яка включає модулі збору і обробки даних, прогнозування динаміки параметрів двигуна, а також формування рекомендацій щодо експлуатації, що дозволяє адаптивно реагувати на змінні експлуатаційні умови та оперативно виявляти потенційні дефекти. За рахунок використання інноваційних нейро-нечітких класифікаторів і протоколів апробації система забезпечує підвищення точності діагностики та ефективності прийняття рішень, що підтверджено експериментальними дослідженнями і порівняльним аналізом з традиційними методами моніторингу.

У висновках роботи підсумовано основні наукові та практичні результати дослідження, зокрема доведено ефективність розроблених нейромережевих і нечітких методів для моніторингу та управління експлуатацією ГТД вертольотів, що дозволяє досягти високої точності в класифікації, діагностиці, прогнозуванні та контролі технічного стану двигунів.

Дисертація оформлена згідно з вимогами, що пред'являються до докторських дисертацій (наказ Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації»).

Ступінь використання матеріалів і висновків кандидатської дисертації

Результати досліджень, за якими Владов С.І. захистив кандидатську дисертацію за темою «Методи та засоби визначення гемодинамічних показників при діагностуванні порушень системи кровообігу людини», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 «Біологічні та медичні прилади і системи», в його докторській дисертації не використовувались.

Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації

Дисертація Влагова С.І. повністю відповідає стандартам академічної етики. У тексті роботи, а також у наукових публікаціях, що відображають її результати, не виявлено жодних ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації даних, що підтверджується відповідною документацією. Використані ідеї, отримані результати та запозичення з робіт інших авторів оформлені належним чином з обов'язковими посиланнями на джерела, що гарантує достовірність і етичність проведеного дослідження.

Недоліки і зауваження дисертації

1. Не показано, на яких за розміром вибірках були побудовані нейромеревеві моделі моніторингу технічного стану ГТД вертольотів.
2. Не зрозуміло, що докторант розуміє під модулем адаптивного управління параметрів двигуна. Які це параметри і що дає адаптація?
3. Оскільки в дисертації розглядається використання нейромеревевих технологій, в актуальності дисертаційної роботи необхідно було в переліку провідних фахівців згадати вчених, які займаються використанням машинного навчання для прогнозування безвідмовної роботи ГТД вертольотів.
4. В чому полягає аналіз специфіки математичного і програмного забезпечення для розробки архітектури експертної системи моніторингу ГТД вертольотів у режимі льотної експлуатації.
5. Не показано, які класи дефектів дозволяє виявляти запропоновані нейро-нечіткі методи моніторингу.
6. Не зрозуміло, якими кількісними параметрами можна оцінити якість прийняття рішень щодо подальшої експлуатації двигуна.
7. Яким чином було досягнуто оптимальне адаптивне навчання нейромереві і що це дало для покращення моніторингу технічного стану ГТД вертольотів.
8. В порівняльних оцінках, які приведені в роботі, відсутні порівняння за обчислювальними затратами, а саме FLOPS.

Зроблені зауваження носять дискусійний характер, сприяють розвитку подальших досліджень за обраною темою та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації Влодова С.І. «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації».

Висновок

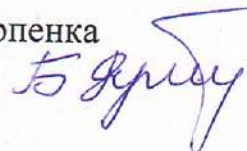
Дисертація Влодова С.І. «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» є цілісною, завершеною науковою працею, виконаною автором самостійно, в якій розв'язано актуальну науково-прикладну проблему розроблення математичного і програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів для підтримки безпеки польотів вертольотів в реальному часі.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертація відповідає вимогам, які висувуються до докторських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалу – паспорту спеціальності 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем».

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем» (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057) та вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7, 8 і 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор, Влодов Сергій Ігорович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем».

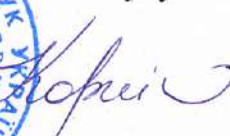
Опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач відділу інформаційних технологій
дистанційного зондування
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України

 Богдан РУСИН

Підпис проф. Русина Б.П. засвідчую.
Учений секретар Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України
к.т.н., ст.н.с.





Валентина КОРНІЙ