

До спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.05
при Національному університеті
«Львівська політехніка»

ВІДГУК

**опонента, доктора технічних наук, професора
ДМІТРІЄВА ОЛЕГА МИКОЛАЙОВИЧА
на дисертаційну роботу Влодова Сергія Ігоровича
за темою: «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів
вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації»,
що подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем**

Актуальність обраної теми дослідження, її зв'язок із науковими програмами, планами, темами, грантами.

Актуальність обраної теми визначається необхідністю забезпечення безпеки польотів вертольотів у режимі реального часу, що є ключовою складовою загальної авіаційної безпеки. Сучасні газотурбінні двигуни (ГТД) вертольотів характеризуються багатопараметричністю та високою динамікою експлуатаційних процесів, тому постійний моніторинг їх технічного стану є життєво важливим для своєчасного виявлення можливих несправностей та дефектів. Запропоновані методи з використанням нейромережових технологій дозволяють значно підвищити оперативність і точність аналізу технічного стану двигунів, що безпосередньо впливає на рівень безпеки польотів.

Розробка математичного та програмного забезпечення для моніторингу ГТД вертольотів має важливе практичне значення, адже існуючі системи часто є закритими та обмеженими в можливостях адаптації до специфічних умов експлуатації. Впровадження інтелектуальних алгоритмів, зокрема нейромережових та нейро-нечітких методів, сприяє створенню більш адаптивних і гнучких систем управління, що дозволяють інтегрувати моніторинг у складні системи прийняття рішень. Такі підходи не лише зменшують витрати часу на діагностику, але й оптимізують експлуатаційні витрати, забезпечуючи високу якість обслуговування та надійність роботи двигунів.

Зв'язок дослідження з науковими програмами та грантовою підтримкою є ще одним суттєвим чинником його актуальності. Робота виконана в рамках Угоди між Урядом України та Урядом Французької Республіки щодо офіційної підтримки створення єдиної системи авіаційної безпеки та цивільного захисту в Україні. Крім того, дослідження ґрунтується на положеннях Національної

транспортної стратегії України до 2030 року та реалізується у рамках науково-дослідної роботи Харківського національного університету внутрішніх справ (реєстраційний номер 0123U104884, терміни: 02.2024–12.2025). Це забезпечує широке наукове та практичне визнання, а також сприяє інтеграції розроблених методів у національну систему авіаційної безпеки.

Отже, обрана тема є надзвичайно актуальною з огляду на сучасні виклики у забезпеченні безпеки польотів вертольотів та оптимізації експлуатаційних процесів. Використання інноваційних методів моніторингу на основі нейромережових технологій дозволяє не тільки підвищити оперативність виявлення несправностей, а й інтегрувати результати дослідження в існуючі системи управління авіаційною безпекою. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до автоматизації та інформатизації процесів, забезпечуючи високий рівень адаптивності та ефективності систем управління.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформовані у дисертації, теоретично обґрунтовані, оскільки базуються на глибокому вивченні та узагальненні наукових праць вітчизняних та зарубіжних дослідників з питань створення математичного і програмного забезпечення для систем моніторингу складних динамічних об'єктів, зокрема, ГТД вертольотів. Список використаних джерел містить 548 найменувань. Структура і кількість опрацьованих літературних джерел свідчить про глибину проведеного дослідження, автор посилається на класичні та сучасні праці відомих фахівців як з України, так і з провідних країн світу.

Обґрунтованість результатів дисертації Влодова С.І. підтверджується застосуванням системного підходу, що включає:

- аналіз існуючих рішень, методів обробки даних та визначення вимог до моніторингу ГТД вертольотів для розробки математичного і програмного забезпечення;

- нейромережові методи, які створюють моделі для класифікації, контролю, діагностики, прогнозування та аналізу трендів;

- методи нечіткої логіки, нечітких правил та нейро-нечітких мереж для обробки даних в умовах невизначеності, що забезпечують адаптивність і стабільність систем управління;

- об'єктно-орієнтований та системний аналіз і проектування для розробки бортової експертної системи моніторингу;

- методи штучного інтелекту та об'єктно-орієнтоване програмування для реалізації розроблених моделей у вирішенні прикладних задач моніторингу ГТД вертольотів.

Глибокий аналіз дисертації, реферату та наукових публікацій Влодова С.І. дає підстави вважати, що тези, висновки та рекомендації автора ґрунтовно

обґрунтовані відповідними методологічними підходами, мають високу достовірність та відзначаються значною науковою оригінальністю. Додатково, дослідження демонструють послідовність і системність підходів, що відкриває широкі перспективи для практичного застосування отриманих результатів.

Достовірність отриманих результатів дисертації Влодова С.І. підтверджено їх використанням у практичній діяльності підприємств України та Польщі. Результати дисертації апробовані та впроваджені в ТОВ «ЕЙР ТАУРУС», у військовій частині 2269 Національної гвардії України Міністерства внутрішніх справ України, а також в Департаменті авіаційної безпеки Міністерства внутрішніх справ України. Результати дисертації також впроваджені в освітню та наукову діяльність таких закладів вищої освіти: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; Харківський національний університет радіоелектроніки; Льотна академія Національного авіаційного університету; Харківський національний університет внутрішніх справ, Національний університет «Львівська Політехніка»; Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ; Жешувський технологічний університет, Жешув, Польща; Університет Економіки, Бидгощ, Польща.

Одержані наукові результати дисертації характеризуються науковою новизною, дозволяють в подальшому удосконалити існуюче і розробляти нове математичне та програмне забезпечення моніторингу ГТД вертольотів.

Наведене свідчить про перспективи використання дисертації Влодова С.І. у практичній площині розвитку специфічного математичного та програмного забезпечення та його застосування в авіаційній галузі.

Наукова новизна положень, сформульованих в дисертації.

У дисертації Влодова С.І. розв'язано важливу науково-прикладну проблему розроблення нових та удосконалення відомих методів, математичного та програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів задля підтримки безпеки польотів в реальному часі. Це надало змогу отримати низку нових наукових результатів.

Автором вперше створено архітектуру експертної системи моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів шляхом комбінування нейромережевої підсистеми моніторингу та автоматизованої підсистеми управління (АПУ). Це дозволило підвищити рівень автоматизації, оперативності та достовірності моніторингу і управління їх технічним станом у режимі льотної експлуатації вертольоту.

Також автором вперше розроблено метод побудови нейромережевої моделі моніторингу, ключовою особливістю якого є розроблений алгоритм формування однорідної і репрезентативної навчальної і тестової вибірок. Застосування

розробленого методу дозволяє збільшити достовірність визначення технічного стану ГТД вертольотів.

Автором здійснено удосконалення методів класифікації, контролю, діагностики, прогнозування, налагодження, тренд-аналізу технічного стану ГТД вертольотів шляхом модифікації алгоритмів навчання і архітектур нейронних мереж, зокрема, гібридних комбінацій адаптивних елементів, що дозволило підвищити точність розв'язку прикладних задач моніторингу.

Варто відзначити, що у дисертації Влодова С.І. удосконалено модель триканальної АПУ як складової 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. Проведені модифікації надали змогу значно покращити показники якості каналів управління.

Автором також 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 льотної експлуатації.

У дисертації Влодова С.І. набули подальшого розвитку нейро-нечіткі методи моніторингу, в яких, автором застосовано гібридні нейро-нечіткі класифікатори з еволюційною діагностичною матрицею з модернізованими нечіткими правилами. Це надало змогу підвищити впевненість прийняття рішень щодо наявності дефектів й підвищити точність отримання основних параметрів робочого процесу двигуна в умовах неоднозначності. Також автором розвинуто методи відновлення інформації за відмови штатних сенсорів ГТД вертольотів за рахунок застосування байєсової нейронної мережі, навчання автоасоціативної нейронної мережі на площині помилок та рекурентної нейронної мережі алгоритмом багатовимірною фільтра Калмана з поліномом Чебишева. Це надало змогу зменшити похибку реконструкції значень параметрів двигуна.

Практичне значення отриманих результатів дослідження.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні бортової експертної системи моніторингу та управління експлуатацією ГТД вертольотів, що базується на інтелектуалізації основних процесів класифікації, контролю, діагностики, прогнозування, налагодження та тренд-аналізу із застосуванням кількісних і якісних моделей двигунів, доповнених розробленим математичним і програмним забезпеченням.

Досягнуто суттєвих успіхів у розробці алгоритму формування однорідних і репрезентативних навчальних і тестових вибірок за даними термогазодинамічних параметрів двигуна, що дозволило досягти 99%

достовірності визначення можливості здійснення польоту, а також удосконалено алгоритми навчання і архітектури нейронних мереж, забезпечивши середню точність вирішення прикладних задач моніторингу на рівні 99,5%. Крім того, розроблено програмне забезпечення «MONITOR» v.0.1, яке здатне проводити обчислення параметрів і прогнозувати розвиток сценаріїв польотних ситуацій при виникненні непередбачуваних обставин, що зумовлені технічним станом двигуна.

Створено прототип бортової експертної системи, застосування якого дозволяє підвищити якість прийняття рішень щодо можливості експлуатації двигуна до 99,2%, а також запропоновано практичні рекомендації для покращення кваліфікації командира екіпажу, другого пілота та бортового інженера з метою підвищення ефективності роботи екіпажу та безпеки польотів. За результатами експериментальних досліджень в умовах ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» та військової частини 2269 НГУ встановлено, що впровадження розробленого програмного забезпечення надає можливість в режимі реального часу здійснювати обчислення параметрів двигунів та отримати рекомендації щодо здійснення польоту з використанням штучних нейронних мереж.

Оцінка повноти викладення дослідження в опублікованих роботах.

Публікації Влодова С.І. відображають основний зміст дисертації. За темою дисертації опубліковано 90 наукових праць (з них 52 наукових статей у зарубіжних виданнях, що мають індексацію у наукометричній базі Scopus), що дають автору право на публічний захист дисертації. Влодова С.І. є автором (співавтором) 3 монографій, які опубліковано за результатами наукових досліджень.

Основні результати та положення дисертації обговорено на 39 наукових семінарах і конференціях як загально-соціальної, так і технічної спрямованості протягом 2018–2024 років, зокрема: IEEE International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC) (Київ, 2018 і 2022 роки); 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Київ, 2020 рік); 2022 and 2023 IEEE 3rd and 4th KhPI Week on Advanced Technology (Харків, 2022 і 2023 роки); 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Київ, 2022 рік); 2022 and 2023 IEEE 4th and 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) (Кременчук, 2022 і 2023 роки); IEEE 17th–19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT) (Львів, 2022–2024 роки), Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (Львів, 2024 рік).

Реферат за своїм змістом повністю відповідає основним положенням та висновкам дисертації, відображає її структуру та логіку викладення матеріалу, у тому числі, елементів наукової новизни та практичної цінності.

Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації.

Дисертація Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» відповідає принципам академічної доброчесності відповідно до ст. 42 Закону України «Про освіту». У дисертації та наукових працях Влодова С.І., які відображають її результати, відсутній академічний плагіат, фабрикація та фальсифікація, що підтверджено відповідною довідкою. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Окрім того, у дисертації Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» матеріали дисертації Влодова С.І. за темою «Методи та засоби визначення гемодинамічних показників при діагностуванні порушень системи кровообігу людини» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи не використовувались.

Дискусійні питання та зауваження до роботи.

1. В основу дисертації покладена ідеологія IDEF0 (стор. 57), проте у першому розділі дисертації ця ідеологія не розкривається, а обґрунтування доцільності саме її застосування майже не наведені.

2. У підрозділі 2.2 щодо формування навчальних вибірок варто більш детально пояснити критерії вибору контрольних параметрів та методи оцінки їх значущості.

3. У підрозділі 3.3, що стосується діагностики дефектів основних вузлів ГТД, немає експериментального підтвердження ефективності моделі. Доцільно включити аналіз похибок або порівняння з іншими методами.

4. З рис. 4.2 (стор. 189) не зрозуміло, у чому різниця між блоками «ГТД», «Модель ГТД» (перша) та «Модель ГТД» (друга)? Яку невідповідність показує похибка ГТД?

5. У підрозділі 4.2 (стор. 195), де представлено алгоритм адаптивного керування параметрами ГТД вертольотів, недостатньо розкрито питання вибору оптимальних параметрів навчання нейромережі. Було б корисно додати пояснення щодо адаптації вагових коефіцієнтів під час експлуатації.

6. У підрозділі 4.4 (стор. 207), що стосується реалізації механізму корекції режимів роботи ГТД, не враховано вплив температурних факторів на стійкість роботи нейромережі. Варто додати аналіз впливу температурного дрейфу на процес корекції параметрів.

7. У підрозділі 4.4, що стосується забезпечення відмовостійкості нейромережевого контролера, недостатньо аналізу чутливості системи до різних сценаріїв відмов.

8. У підрозділі 6.1 (стор. 298), що присвячений використанню автоенкодерів для реконструкції даних сенсорів, не розглянуто вплив різних типів відмов (стрибкоподібні, повільні зсуви, періодичні відмови). Варто оцінити ефективність автоенкодера при різних видах несправностей.

9. У підрозділі 6.3 щодо використання фільтра Калмана для обробки відмов датчиків слід провести аналіз його обчислювальної складності та можливої затримки у реальному часі.

10. У підрозділі 6.4 (стор. 320), що стосується експертної системи моніторингу, відсутній аналіз потенційних конфліктів між висновками нейромережевого модуля та експертної логіки. Було б корисно запропонувати механізм узгодження суперечливих результатів.

11. 3 таблиці основних етапів модифікації масиву даних термогазодинамічних параметрів ГТД вертольотів (у випадку однорідності навчальної і тестової вибірок, але за відсутності їх репрезентативності) (стор. 429) не зрозуміло, хто визначає вид алгоритму кластеризації, або їх послідовність застосування.

12. Зі схеми проєкту відмовостійкої АПУ ГТД вертольотів з блоком нейромережових регуляторів (стор. 460) не зрозуміло, який сигнал надходить на вхід селектора каналів?

13. 3 таблиці застосованого алгоритму виявлення та локалізації відмови каналу двоканального датчика (стор. 489) не зрозуміло, яка ситуація буде при $WSSR_1 = WSSR_2 = 2$.

14. У тексті дисертації мають місце незначні граматичні, стилістичні та пунктуаційні помилки, які жодним чином не впливають на науковий сенс роботи.

Проте подані зауваження не знижують високий рівень теоретичної та практичної цінності дисертації Влодова С.І., не мають принципового значення та не впливають на її загальну позитивну оцінку. Деякі з них можна розглядати як рекомендації здобувачу щодо можливих напрямків подальших досліджень зазначеної науково-прикладної проблеми.

Загальний висновок до дисертації та її відповідність встановленим вимогам.

Дисертація Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» є завершеною науковою працею, виконану автором самостійно на актуальну тему. Дисертація має теоретичну та практичну значимість, містить наукову новизну, аргументована на високому рівні. Дисертація побудована логічно, викладена науковою мовою.

Поставлену мету дисертації – розроблення математичного і програмного забезпечення моніторингу технічного стану і управління експлуатацією ГТД вертольотів в умовах льотної експлуатації задля підтримки безпеки польотів

вертольотів в реальному часі за невизначеності впливаючих чинників для запобігання їх виходу на критичний режим – досягнуто, задачі дослідження виконано.

Зміст дисертації Влодова С.І. відповідає поставленій меті та відображає логіку дослідження. Наукові положення, висновки і рекомендації, представлені у дисертації, достатньо обґрунтовані і підкріплені результатами аналізу значної кількості наукових джерел та інформації щодо діяльності окремих підприємств, що здійснюють технічне обслуговування та льотну експлуатацію вертольотів. Зміст дисертації засвідчує логічність та завершеність дослідження і відповідає паспорту спеціальності 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

Реферат дисертації в повній мірі відображає основні наукові положення, викладені у ній, її наукову новизну і практичну значимість, відповідає змісту дисертації.

У цілому дисертація за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» відповідає вимогам пунктів 7, 8 і 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197 «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», що є підставою для присудження її автору, Влодову Сергію Ігоровичу, наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

Опонент:

Провідний науковий співробітник
науково-інформаційного відділу
Державного науково-дослідного
інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
доктор технічних наук, професор



Олег ДМІТРІЄВ

Підпис Дмитрієва О.М. засвідчую.

Тимчасово виконуючий обов'язки заступника начальника
Державного науково-дослідного
інституту випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки з наукової роботи
доктор технічних наук, професор




Вадим СИВАК