

До спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.05
при Національному університеті
«Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, Львів
79000

ВІДГУК

опонента доктора технічних наук, професора,
професора кафедри штучного інтелекту
Харківського національного університету радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України
БОДЯНСЬКОГО ЄВГЕНІЯ ВОЛОДИМИРОВИЧА

на дисертаційну роботу Влодова Сергія Ігоровича за темою:
«Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі
нейромережових технологій під час їх експлуатації»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем»

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

Актуальність теми дослідження обумовлена зростаючою необхідністю забезпечення безпеки польотів вертольотів у режимі реального часу, що є критично важливим для сучасної авіаційної інфраструктури. Моніторинг технічного стану газотурбінних двигунів (ГТД) вертольотів відіграє ключову роль у виявленні потенційних несправностей і запобіганні аварійним ситуаціям. Сучасні системи мають суттєві обмеження через недостатню автоматизацію процесів збору, обробки та аналізу даних, що підсилює потребу в розробці новітніх інтелектуальних підходів з використанням нейромережових технологій.

Запровадження нейромережових методів і моделей моніторингу ГТД вертольотів дозволяє значно підвищити точність та оперативність прийняття рішень. Завдяки інтеграції інтелектуальних алгоритмів аналізу даних можливо скоротити час виявлення експлуатаційних дефектів та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню загальної ефективності та безпеки експлуатації вертольотів.

Обрана тема має тісний зв'язок із державними та міжнародними науковими програмами й стратегіями розвитку авіаційної безпеки. Зокрема, дисертаційна робота Влодова С.І. виконана в рамках Угоди між Урядом України та Урядом Французької Республіки щодо створення єдиної системи

авіаційної безпеки та цивільного захисту (Угоду ратифіковано Законом України від 07.06.2018, № 2452-VIII), а також відповідає основним положенням Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Такий підхід забезпечує стратегічну актуальність дослідження, адже його результати інтегруються у широкомасштабні ініціативи з підвищення безпеки польотів.

Окрім того, проведене дослідження інтегрується в низку науково-дослідних проектів та грантових програм, спрямованих на удосконалення математичних моделей і програмного забезпечення для моніторингу експлуатації авіаційних двигунів. Виконання дисертаційної роботи в межах проекту Харківського національного університету внутрішніх справ за державною реєстрацією «Теоретичні та прикладні аспекти розвитку авіаційної сфери» (реєстраційний номер 0123U104884) підтверджує її інноваційний характер і практичну значущість для галузі. Отже, результати дослідження мають високий потенціал для впровадження у виробництво та сприяння розвитку новітніх технологій забезпечення авіаційної безпеки.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи Вladoва С.І. базуються на ґрунтовному аналізі сучасних математичних моделей, методів обробки даних та нейромережових технологіях. Ретельно розроблені методи класифікації, контролю, діагностики та прогнозування технічного стану ГТД вертольотів забезпечують високу обґрунтованість теоретичних положень роботи.

Отримані наукові результати дисертаційної роботи базуються на таких загальноновизнаних та специфічних методах дослідження, як:

- 1) системний підхід, що включає аналіз існуючих рішень, методів обробки даних і визначення вимог до моніторингу ГТД вертольотів для аналізу специфіки побудови математичного і програмного забезпечення;
- 2) нейромережові методи для створення моделей моніторингу, що дозволяють удосконалити обчислювальні методи для класифікації, контролю, діагностики, прогнозування та аналізу трендів;
- 3) методи нечіткої логіки, нечітких правил та нейро-нечітких мереж для обробки даних в умовах неопределеності та нечіткості вхідних даних, що дозволяє забезпечити адаптивність і стабільність підсистеми управління ГТД вертольотів в умовах змінних експлуатаційних параметрів;
- 4) методи об'єктно-орієнтованого та системного аналізу і проектування для проектування та розроблення бортової нейромережової експертної системи моніторингу ГТД вертольотів;
- 5) методи штучного інтелекту, об'єктно-орієнтоване програмування для програмної реалізації розроблених методів і моделей для розв'язання прикладних задач моніторингу ГТД вертольотів.

Обґрунтованість дослідження посилюється використанням модифікованих нейромережових підходів, які були апробовані шляхом розбиття даних на

репрезентативні навчальні та тестові вибірки з подальшим проведенням кластерного аналізу. Такий підхід дозволив не тільки підвищити точність виявлення дефектів, а й забезпечити адаптивність розробленої моделі до умов реальної експлуатації, що свідчить про методологічну надійність дослідження.

Достовірність отриманих результатів підтверджується високими показниками точності ідентифікації параметрів, що перевищують 99 %. Проведені чисельні експерименти та порівняльний аналіз із традиційними методами демонструють, що застосування інноваційних нейромережових технологій дозволяє значно знизити похибки при моніторингу технічного стану, що є важливим критерієм ефективності дослідження.

Висновки та рекомендації роботи сформульовані на основі комплексного підходу, що об'єднує теоретичні розробки, експериментальне дослідження та практичну апробацію у реальних умовах льотної експлуатації вертольотів. Така інтеграція наукових методів і практичних випробувань гарантує, що рекомендації мають високий потенціал для впровадження, сприяючи підвищенню безпеки польотів та оптимізації експлуатації ГТД вертольотів.

Отже, ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень у дисертаційній роботі Влодова С.І. є високим завдяки системному аналізу, застосуванню сучасних методів нейромережового моделювання, а також підтвердженню отриманих результатів експериментальними даними та практичною апробацією.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи Влодова С.І. полягає у вирішенні важливої науково-прикладної проблеми розроблення нових та удосконалення відомих методів, математичного та програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів задля підтримки безпеки польотів в реальному часі. У дисертаційній роботі Влодова С.І. отримано такі нові наукові результати:

1) уперше створено архітектуру експертної системи моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів, яка за рахунок комбінування нейромережової підсистеми моніторингу та автоматизованої підсистеми управління (АПУ), дозволяє підвищити рівень автоматизації, оперативності та достовірності моніторингу і управління їх технічним станом у режимі льотної експлуатації вертольоту;

2) уперше розроблено метод побудови нейромережової моделі моніторингу, який за рахунок алгоритму формування однорідної і репрезентативної навчальної і тестової вибірок, дозволяє збільшити достовірність визначення технічного стану ГТД вертольотів;

3) 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;

4) удосконалено модель триканальної 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;

5) 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;

6) 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;

7) 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 багатовимірного фільтра Калмана з поліномом Чебишева, дозволяє зменшити похибку реконструкції значень параметрів двигуна.

З огляду на отриману наукову новизну дисертаційної роботи Влагова С.І. можна стверджувати, що автором отримано вагомні результати, що мають наукове і практичне значення. Окреслені підходи суттєво доповнюють теоретико-методологічну основу наукової проблематики розвитку математичного і програмного забезпечення у сфері моніторингу і управління експлуатацією складних динамічних об'єктів (на прикладі ГТД вертольотів).

Ключові положення дисертаційної роботи Влагова С.І., її висновки, пропозиції та рекомендації підтверджуються послідовним узагальненням здобутих результатів, ретельно обґрунтовані у представленому викладі та вирізняються високим рівнем наукової аргументації та інноваційності.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні експертної системи моніторингу та управління експлуатацією ГТД вертольотів, що забезпечує своєчасне виявлення потенційних несправностей і суттєве підвищення рівня авіаційної безпеки. Запропоновані методи нейромережевого аналізу дозволяють автоматизувати процеси збору, обробки та аналізу даних, що є надзвичайно важливим для підтримання безпечного експлуатаційного стану авіаційної техніки.

Практична реалізація програмного забезпечення «MONITOR» сприяє оптимізації витрат часу на технічне обслуговування та зменшенню експлуатаційних ризиків. Завдяки високій точності визначення параметрів (до 99,5 %), система дозволяє оперативно ідентифікувати дефекти та прогнозувати можливі відхилення в роботі двигуна, що сприяє своєчасному прийняттю відповідних заходів.

Впровадження розробленої експертної системи в умовах реальної експлуатації підтверджує її ефективність як у цивільній авіації, так і у військових підрозділах. Практична апробація в ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» та на прикладі військової частини 2269 демонструє можливість значного підвищення якості прийняття рішень екіпажем, що безпосередньо впливає на зниження ризиків аварійних ситуацій та оптимізацію експлуатаційних процесів.

Отримані результати мають також велике значення для подальшого розвитку науково-технічного потенціалу галузі. Розроблені методи можуть бути інтегровані у сучасні системи діагностики та управління, що сприяє оптимізації ресурсів, зниженню витрат на технічне обслуговування та підтримці високих стандартів безпеки в авіаційній сфері.

Отже, практична цінність дисертаційної роботи Влодова С.І. є значною і полягає в її здатності забезпечити ефективне управління технічним станом ГТД вертольотів за допомогою нейромережових технологій, що сприяє не лише підвищенню безпеки польотів, а й оптимізації експлуатаційних процесів і зниженню загальних витрат на обслуговування авіаційної техніки.

Оцінка змісту, структури та завершеності дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Влодова С.І. має класичну структуру, викладена на 515 сторінках друкованого тексту (із них 336 сторінок основного тексту), а саме: анотація, вступ, шість розділів з відповідними підрозділами, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Дисертаційна робота Влодова С.І. побудована відповідно до встановлених вимог (наказ Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017, № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації»). Дисертаційна робота Влодова С.І. містить 13 таблиць, 183 рисунків, 7 додатків. Список використаних джерел налічує 548 найменувань й викладений на 58 сторінках.

У вступі подано загальний опис роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету та ключові завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методологію дослідження, окреслено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено інформацію про публікації та індивідуальний внесок автора у співавторські роботи, а також дані про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі проводиться ґрунтовний аналіз проблематики розроблення математичного та програмного забезпечення для моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів. Встановлено, що основними недоліками сучасних систем є ізольоване функціонування у критичних аварійних ситуаціях, відсутність уніфікованого банку даних для випробувань та

неструктурованість різномірної інформації, що значно ускладнює процес прийняття оперативних рішень. Запропонована архітектура експертної системи моніторингу, що базується на інтеграції нейромережових модулів, автоматизованої підсистеми управління та централізованої бази даних, що забезпечує ефективну обробку та аналіз інформації в режимі реального часу.

У другому розділі розроблено метод побудови нейромережової моделі моніторингу ГТД вертольотів, що базується на алгоритмі формування однорідної та репрезентативної навчальної і тестової вибірок. Зокрема, обґрунтовано вибір унікальних критеріїв і метрик для оцінки ефективності моніторингу, визначено оптимальну структуру нейронної мережі та алгоритм її навчання з урахуванням специфіки аналізу термогазодинамічних параметрів двигуна. За допомогою теорії газодинамічної подібності здійснено нормалізацію вихідних величин, що дозволило провести кластерний аналіз та виділити вісім класів, підтверджуючи репрезентативність формованих вибірок і високий рівень точності моделі, що є основою для ефективного моніторингу технічного стану ГТД вертольотів у режимі льотної експлуатації. Розроблено математичне і програмне забезпечення для оптимізації параметрів робочого процесу ГТД шляхом вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, що дозволяє визначити глобальну Парето-оптимальну множину рішень. Запропоновано низку нейромережових методів ідентифікації термогазодинамічних параметрів основних вузлів ГТД при сталих режимах роботи, що сприяє підвищенню точності діагностики та прогнозування експлуатаційного стану двигуна.

У третьому розділі розроблено нейромережові методи класифікації, контролю, діагностики, прогнозування, налагодження та тренд-аналізу технічного стану ГТД вертольотів на основі модифікованих алгоритмів навчання та сучасних архітектур нейронних мереж. Зокрема, створено математичне і програмне забезпечення для ідентифікації параметрів двигуна у динамічних режимах роботи, що ґрунтується на модифікації нейронної мережі Елмана з впровадженням динамічної стекової пам'яті, а також розроблено метод контролю з використанням мережі LSTM для розподілу параметрів за зонами справного, несправного та невизначеного станів. Крім того, розвинено гібридний підхід до класифікації дефектів проточної частини двигуна, який забезпечує деталізовану діагностику по окремих вузлах та сприяє підвищенню точності прийняття оперативних рішень щодо експлуатації ГТД вертольотів.

У четвертому розділі розроблено та апробовано методи самонастроювання та оптимізації процесів управління ГТД вертольотів із застосуванням нейронних мереж, що забезпечують покращення якості перехідних процесів порівняно зі штатними регуляторами. Проведені експерименти, проілюстровані графіками зміни частоти обертання ротора турбокомпресора та ротора вільної турбіни і регулювання інтегратора, демонструють, що використання налаштованої моделі ГТД вертольотів дозволяє ефективно компенсувати зміну параметрів протягом перехідного процесу та досягати вищої точності управління. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню загальної ефективності

системи управління за рахунок попереднього самонастроювання, що оптимізує роботу двигуна в умовах змінних експлуатаційних параметрів.

У п'ятому розділі розвинено підхід моніторингу технічного стану ГТД вертольотів, що ґрунтується на використанні математичного апарату нечіткої логіки та нечітких експертних систем. Для системи створено універсальну діагностичну матрицю, у якій перший стовпець містить імітовані дефекти, а інші компоненти формують вектор параметрів, отриманих із вимірювань роботи двигуна. Запропонований метод дозволяє проводити об'єктивну класифікацію дефектів за принципом «найближчого сусіда», що сприяє своєчасному виявленню відхилень від нормального режиму експлуатації та забезпечує підвищення точності діагностики технічного стану ГТД вертольотів. Це, у свою чергу, сприяє оптимізації процесів технічного обслуговування та підвищенню безпеки польотів. Також створено метод нейро-нечіткого регулювання витрати палива ГТД вертольотів, що базується на адаптивній нейро-нечіткій системі, яка впроваджує нечіткий висновок Сугено за допомогою п'ятишарової мережі прямого поширення. Завдяки цьому підходу забезпечується моніторинг годинної витрати палива в режимі реального часу з точністю до 99,2 %.

У шостому розділі набули подальшого розвитку методи виявлення параметричних відмов датчиків, зокрема їх деградації, шляхом застосування байєсових нейронних мереж, автоасоціативних нейромереж та рекурентних алгоритмів з використанням фільтра Калмана. Здійснено апробацію розробленого математичного та програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів через комплексні експериментальні дослідження в режимі льотної експлуатації. Проведені випробування як на цифрових моделях, так і в реальних умовах польотів підтвердили підвищення точності діагностики, скорочення часу виявлення дефектів та оптимізацію витрат на технічне обслуговування.

У висновках окреслено основні результати дослідження у рамках вирішення актуальної науково-технічної проблеми – розробці математичного і програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів задля підтримки безпеки польотів вертольотів у реальному часі шляхом застосування нейромережових технологій і розробки експертної системи.

Список використаних джерел оформлено за встановленими вимогам відповідно до ДСТУ 8302:2015.

У додатках наведено графічний та табличний матеріали, а також акти впровадження результатів дисертаційної роботи Влодова С.І.

Оцінка повноти викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях та їх відповідність встановленим вимогам

Основні положення та результати дисертаційної роботи Влодова С.І. 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.

Усі положення дисертаційної роботи Влодова С.І. та основні результати досліджень отримані автором самостійно. У публікаціях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача відображено повною мірою. Зокрема, автором розроблено та удосконалено нейромережеві та нейро-нечіткі методи, моделі і системи для моніторингу, діагностики, прогнозування, відновлення інформації, класифікації відмов датчиків, оптимізації параметрів роботи та управління ГТД вертольотів за рахунок модифікації архітектур та алгоритмів навчання нейронних мереж та інтеграції сучасних підходів до автоматизованого управління. У дисертаційній роботі Влодова С.І. використано виключно ті результати, що є особистим внеском здобувача.

Основні результати та положення дисертаційної роботи Влодова С.І. апробовані на 39 наукових семінарах і конференціях протягом 2018–2024 років. Зокрема можна відзначити: 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).

Отже, наукове викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи Влодова С.І. є всебічним і відповідає встановленим вимогам, що підтверджується широкою базою публікацій у міжнародних наукометричних базах (Scopus) та апробацією на 39 наукових семінарах і конференціях. Особистий внесок автора повністю відображено у всіх опублікованих працях, що свідчить про високий рівень наукової аргументації та новизни дослідження.

Оцінка відсутності/наявності академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації у дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Влодова С.І. не містить ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації відповідно до ст. 42 Закону України «Про освіту». Усі результати дисертаційної роботи Влодова С.І. отримано автором самостійно, а використання ідей, даних та текстів інших авторів завжди супроводжується відповідними посиланнями на джерела.

Оцінка результатів, висвітлених в дисертації, які виносилися на захист дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Наукові положення, дослідження та результати, які виносилися на захист дисертаційної роботи 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», захищеної на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.052.05 при Харківському національному університеті радіоелектроніки 12 травня 2015 року, на захист у представлений дисертаційній роботі Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем» не виносяться.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертаційної роботи

Реферат дисертаційної роботи Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» містить лише наукові й практичні положення, які відображені у дисертаційній роботі.

Відповідність дисертаційної роботи паспорту спеціальності

Зміст дисертаційної роботи Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» відповідає профілю спеціалізованої вченої ради та паспорту спеціальності 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем» у частині його формули та напрямків досліджень, зокрема:

- 1) методи організації ефективних обчислень на ЕОМ, комплексах і мережах;
- 2) інтелектуальні прикладні програмні системи;
- 3) експертні системи;
- 4) інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень.

Дискусійні питання та зауваження щодо дисертаційної роботи

1. Як відомо, використання РБФ-нейронних мереж наштовхується на, так званий, ефект «прокльону розмірності». Оскільки автор вирішує прикладні задачі, слід було б прокоментувати, чи не виникав цей ефект при вирішенні цих задач.

2. Навчання багатошарових персептронів наштовхується на небажаний ефект «зникаючого градієнта». У глибоких нейронних мережах саме цьому використовуються активаційні функції спеціального типу, але це веде до суттєвого збільшення кількості прихованих шарів. Автор у роботі в якості активаційної використовує Smooth ReLU функцію, що не задовольняє умовам теореми Дж. Цибенка, тому слід було б вказати або наскільки знизилась

точність апроксимації, або наскільки потрібно збільшити кількість прихованих шарів у мережі.

3. Автор використовує нейронні мережі з часовими затримками Елмена та Джордана, в той же час існує мережа Зіпсера-Нікольса, яка об'єднує у собі переваги зазначених мереж.

4. Слід було би більш чітко описати переваги запропонованої модифікації LSTM - мережі та вказати скільки GRU-блоків вона містить.

5. Автор використовує ансамблі нейромереж, але не вказує як об'єднуються їх вихідні сигнали. Доцільно було б використати беггінговий підхід. До того ж RBFN та MLP навчаються у контрольованому режимі, а SOM Кохонена у режимі самонавчання. Можливо було би більш доцільно замість SOM використати LVQ Кохонена.

6. Слід було би більше зупинитися на алгоритмах кластеризації. У випадку, що розглядається, вельми ефективними були б алгоритми нечіткої кластеризації типу FCM або Густафсона-Кесселя.

7. GRNN- мережа вирішує задачу інтерполяції, а не екстраполяції, тому вона може давати погані результати на забруднених даних.

8. Автор пише «нечітка нейронна мережа Ванга-Менделя заснована на системі нечіткого висновку Такагі-Сугено-Канга, але TSK дає більш високу точність», «ANFIS практично співпадає з TSK». Помічу, що нейро-фаззі системи Дженга та Ванга-Менделя були опубліковані у 1993р., а TSK – системи у 1995 році.

9. Не зовсім зрозуміло у чому полягає модифікація алгоритму Левенберга-Маквардта. Слід також відмітити, що у системах, чий вхід лінійно залежить від налаштованих синаптичних ваг, можуть бути використані алгоритми оптимізації другого порядку – той же рекурентний метод найменших квадратів, що забезпечує квадратичну швидкість збіжності. Взагалі слід було би більше приділити уваги алгоритмам навчання, оскільки у задачах, що розглядається, швидкість навчання виходить на перший план.

Разом з тим, подані зауваження та дискусійні питання не знижують загального позитивного враження про дисертаційну роботу Влодова С.І. у цілому. Окремі зауваження можна розглядати як рекомендації для ґрунтовнішого дослідження обраної науково-прикладної проблеми.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережевих технологій під час їх експлуатації» за змістом відповідає паспорту спеціальності 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем», є завершеною науковою працею, виконаною автором самостійно. Положення дисертаційної роботи Влодова С.І. містять наукову новизну та мають практичну цінність. У дисертаційній роботі Влодова С.І. на підставі проведених досліджень отримано наукові результати, що є суттєвим авторським внеском у вирішення актуальної науково-прикладної

проблеми – розроблення математичного і програмного забезпечення моніторингу і управління експлуатацією ГТД вертольотів в умовах льотної експлуатації задля підтримки безпеки польотів вертольотів в реальному часі.

За змістом реферат відповідає основним положенням, висновкам і пропозиціям викладеним в дисертаційній роботі Влодова С.І. Наукові положення, висновки і рекомендації, представлені автором у рефераті є обгрунтованими та детально аргументованими. Отримані результати дисертаційної роботи Влодова С.І. є значущими, достатньо оприлюднені, наукові розробки автора мають практичне й наукове застосування.

Наведене свідчить, що дисертаційна робота Влодова С.І. за темою «Методи та засоби моніторингу газотурбінних двигунів вертольотів на основі нейромережових технологій під час їх експлуатації» є завершеною науковою працею, що відповідає вимогам, встановленим до написання дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідно до п. 7–9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021, № 1197, а її автор Влодов Сергій Ігорович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.03 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем».

ОПОНЕНТ

**Професор кафедри штучного інтелекту
Харківського національного
університету радіоелектроніки
доктор технічних наук, професор**



Євгеній БОДЯНСЬКИЙ

**Підпис доктора технічних наук, професора Євгенія БОДЯНСЬКОГО
ЗАСВІДЧУЮ:**

**Учений секретар
Харківського національного
університету радіоелектроніки**



Ірина ЖАРІКОВА