

## **«Розробка теоретичних основ оцінки технічного стану авіаційних двигунів на базі методів штучного інтелекту, розпізнавання образів та теорії статистичних рішень»**

### ***Основні наукові результати***

Перевірено та підтверджено базову гіпотезу про можливість розпізнавання стану авіаційних двигунів з використанням методів розпізнавання образів, теорії статистичних рішень та методів штучного інтелекту. При цьому створено методологію процесу формування, побудови та визначення оптимальних параметрів алгоритмів, що базуються на наступних методах: методи класифікації за евклідовою відстанню між точками просторі ознак; комплексний метод, що базується на використанні методу кластеризації за "картою кластерів"; методи визначення класу за різними мірами відстані; методи дискримінантного аналізу; метод мінімізації ризику, нейроні мережі. Структура отриманого алгоритмічного забезпечення пристосована для ідентифікації класу технічного стану авіаційного двигуна за параметрами функціонування, які реєструються у експлуатації. Методологія включає метод проведення чисельного експерименту з метою отримання наборів даних, що характеризують об'єкт діагностування та необхідні для оптимізації отриманих алгоритмів: навчальний, тестовий та перевірочний; метод оптимізації та перевірки роботоспроможності отриманого методичного, алгоритмічного та програмного забезпечення.

Методологія процесу розпізнавання стану авіаційних двигунів з використанням перерахованих методів включає в себе методи та алгоритми первинної обробки польотної інформації при якій виконується послідовне приведення зареєстрованих параметрів робочого процесу до стандартних атмосферних умов та до заданого режиму роботи двигуна, формування за їхніми значеннями ознак технічного стану ГТД (відносних діагностичних відхилень) та методи визначення за цими ознаками класу технічного стану до якого треба віднести підконтрольний об'єкт.

На першому етапі роботи було розроблено методологію проведення чисельного експерименту, метою якого є отримання наборів даних для навчання нейронних мереж. На цьому ж етапі проведено формування нейронної мережі для розпізнавання випадку дискретної та поступової зміни функціональних характеристик елементів проточної частини ГТД. Для випадку класифікації дискретної зміни досліджено мережу, призначену для класифікації вхідних векторів - LVQ – мережу. Як параметр якості розпізнавання мережі використано величину відсотку помилок розпізнавання. Для більш загального випадку поступової деградації проведено створення мережі методом прямого розповсюдження сигналу і проведено вибір кращого алгоритму навчання - алгоритму сполучених градієнтів Полака – Рібейри (Polak - Ribiere), CGP та порогового алгоритму зворотнього розповсюдження помилки Rprop. Проведено вибір типу нейронів мережі. Найкращі показники за точністю навчання показали мережі з нейронами, що мають функцію активації типу гіперболічного тангенса. Було визначено критерій якості навчання мережі - різниця між критеріями якості класифікації, отриманими на навчальній та на тестовій вибірках. Було проведено навчання двох-, трьох- та чотирьох - шарових мереж з різною кількістю нейронів у шарі з використанням запропонованого критерію як критерію заключного навчання та визначено оптимальну архітектуру мережі. Наприкінці дослідження було проведено створення та навчання нейронної мережі з 4 шарами, призначеної для розпізнавання за неприведеними до режиму роботи ГТД даними класу технічного стану двигуна у широкому діапазоні режимів його роботи. На цьому ж етапі розроблені методи побудови, навчання та розпізнавання стану авіаційних двигунів та газотурбінних установок за параметрами масла та вібраційними параметрами.

На поточному етапі науково - дослідної роботи створено методичне, алгоритмічне та загальне програмне забезпечення ще п'яти груп методів. В ході дослідження було отримано наступні результати.

Сформовано алгоритм додаткової обробки ознак технічного стану для їх використання у методах класифікації, що застосовують різні міри відстані між об'єктами.

Досліджено групу методів класифікації на базі використання методів кластеризації за відстанню між об'єктами у просторі діагностичних нев'язок. Розглянуто наступні методи: кластеризація побудовою бінарного дерева кластерів; група методів, що базуються на визначенні евклідової відстані від точки до: найближчого сусіда; до ряду найближчих сусідів; до ядра класу. Кращі пока-

знижки якості класифікації отримано для методу на базі урахування відстані до найближчого сусіда. Метод забезпечує відсоток помилкового розпізнавання 13 %, відсоток грубих помилок - 3,3 %.

У ході проведення класифікації з використанням методу кластеризації "Карта кластерів" було проведено роботу з визначення оптимальної форми коваріаційної матриці, що використовується при побудові відсічної функції. Як таку матрицю запропоновано використовувати помножену на постійний коефіцієнт коваріаційну матрицю, отриману за ознаками стану. Визначено значення цього коефіцієнту, яке забезпечує кращу якість класифікації. Значення цього коефіцієнту лежить у межах 0,6 - 0,8. Найкращі результати класифікації отримано при поєднанні кластеризації за "картою кластерів" та метода класифікації за  $n$  найближчими сусідами. Метод забезпечує рівень помилок 9 % (2,5 % грубих помилок). На заключному етапі дослідження цієї групи методів проведено вибір міри відстані між об'єктам. Найкращі показники якості показав метод, що базується на мірі відстані Махаланобіса, який забезпечив рівень помилок 4 % (3,3 % грубих помилок).

Проведено розпізнавання класів ТС ГТД з використанням методів дискримінантного аналізу та визначено показники якості розпізнавання. Метод дозволив отримати рівень помилок 3,3 % (2,5 % грубих помилок).

Виконано розробку методу розпізнавання класів ТС ГТД з використанням методу мінімізації ризику. В ході роботи запропоновано новий метод формування матриці втрат в результаті помилки класифікації. Особливістю цієї матриці є те, що вона складена з відносних значень втрат і її результати можуть бути використані для широкого кола об'єктів. Проведено розпізнавання класу ТС ГТД при різних значеннях компонентів матриці втрат. Метод забезпечує рівень помилок 1 % (0 % грубих помилок).

На заключному етапі проведено порівняльний аналіз методів визначення класу технічного стану ГТД. Як витікає з результатів цього аналізу найбільш точно розпізнавання забезпечує метод мінімізації ризику. Крім того використання цього методу дозволяє мінімізувати часові (фінансові) витрати, пов'язані з помилкою при визначенні ТС ГТД. Як альтернативу до цього метода можна рекомендувати використовувати нейронні мережі з прямим розповсюдженням сигналу для випадків діагностування об'єкту ознаки якого не підлягають нормальному розподілу.

### ***Практична цінність***

У процесі створення системи моніторингу технічного стану авіаційного двигуна розробники часто зустрічаються з складним питанням формування керуючих рішень при наявності великого обсягу вхідної інформації. Особливо гостро ця проблема встає при переході до експлуатації авіаційної техніки підвищеної контролепридатності, коли за час виконання типового польоту реєструються десятки мегабайт інформації та сотні параметрів та разових команд. Наявність великих обсягів діагностичної інформації значно ускладнює алгоритми обробки інформації, вимагає високої кваліфікації експерта, збільшує час, потрібний на її аналіз та підвищує імовірність помилки. Одним з перспективних напрямків розв'язання цієї проблеми є використання методів класифікації технічного стану, які дозволяють системі моніторингу обробляти великі обсяги вхідної інформації та самонавчатися у ході роботи. Результатом такого аналізу є класифікація технічного стану ГТД - віднесення двигуна до одного з класів (найпростіший випадок - до класу дефектних або бездефектних двигунів). Після такої класифікації експерт повинен проаналізувати тільки дані про дефектні двигуни.

У ході виконання науково - дослідної роботи було розроблено методологію отримання методичного та алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи класифікації технічного стану ГТД. Наявність такої методології дозволяє прискорити процес створення автоматизованих систем діагностування складних технічних систем, таких, наприклад, як діагностування компонентів авіаційної техніки. Як перспективу розвитку та практичного впровадження розробленої методології слід вважати можливість переходу від автоматизованих систем діагностування, на виході яких користувач отримує діагностичну інформацію, до експертних систем, результатом роботи яких буде формування рекомендацій щодо керуючих дій відносно підконтрольного об'єкту.

Методи та алгоритми класифікації ТС, до якого може бути віднесено ГТД, було виконано

та випробувано на прикладі двигуна ПС-90А. За своєю газодинамічною схемою та основними параметрами робочого процесу ПС- 90А подібний до двигунів сімейства CFM (фірма Снекма), що дає підстави для узагальнення та перенесення отриманих результатів на процес розробки діагностичних систем і для цього сімейства двигунів.

У ході апробації розробленої методології при розробці методу проведення чисельного експерименту, метою якого було отримання наборів даних для навчання та тестування нейронної мережі, створено універсальну математичну модель робочого процесу двигуна ПС-90А другого рівня складності. Модель призначена для розрахунку параметрів робочого процесу двигуна у широкому діапазоні режимів та умов роботи ГТД і може бути параметрично скорегованою для опису технічного стану конкретного двигуна, функціональні характеристики якого відрізняються від середньостатистичних.

Як установи, на яких може бути впроваджено результати науково – технічної роботи, слід назвати вітчизняних та закордонних експлуатантів авіаційної техніки, Пермське науково-виробниче об'єднання "Авіадвигун", Запорізьке ВАТ "МоторСіч", ремонтні заводи цивільної авіації, навчальні заклади авіаційного профілю. Впровадження може відбуватися шляхом включення розроблених методів визначення технічного стану ГТД на засадах альтернативності до існуючих та нових систем діагностування. Шляхи просування на ринок – через участь у розробках автоматизованих (експертних) систем розпізнавання технічного стану авіадвигунів конкретних типів за окремими договорами та участь в науково практичних конференціях, семінарах, опублікування отриманих результатів у наукових виданнях, у інформаційних буклетах, шляхом презентацій та прямих переговорів з можливим замовником.

Результати НДР були використані при виконанні однієї госпдоговірної роботи з ЗАО "УРАРП" і впроваджені в українсько-російське авіапідприємство в рамках системи "Контроль Д-30КП" для діагностування двигунів Д-30КП силової установки літака Іл-76. Параметрична інформація та дані про відмови двигунів в реальній експлуатації використовувались для діагностування та побудови "портретів" несправностей авіадвигунів Д-30КП та їх попередження в експлуатації.

#### **Перелік основних наукових публікацій, доповідей на конференціях, семінарах**

1. Кучер О.Г., Якушенко О.С., Сухоруков В.Ю. Розпізнавання технічного стану авіаційних ГТД з використанням нейронних мереж. -Запоріжжя: ЗНТУ, ХАІ, МоторСіч, №1, 2002. - С.101 - 106.
2. О.С.Якушенко. Оптимізація алгоритму та програмного забезпечення математичної моделі робочого процесу газотурбінного двигуна //Вісник НАУ. -К. -2002. – N4(9). - С.35 - 39.
3. Орлов І.О. Діагностування технічного стану КУ за накопиченням в оливі продуктів спрацювання // Нафт. і газова пром-сть. – 2003. – №3. – С. 48-50.
4. Доповідь на СНТО на тему "Діагностування авіаційних двигунів низької контролепридатності на прикладі двигунів Д-30КП/ доп. студ. 5 курсу АКФ Харитон В.В., керівник Кучер О.Г.
5. ТЗ на разработку автоматизированной системы контроля технического состояния и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП на самолетах Ил-76 (АС «Алгоритм Д-30КП») / Науч.рук.Кулик Н.С., отв.исп.Кучер А.Г. – НАУ НИИА, 2003. -38 с.
6. Методика оценки технического состояния и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП. Методическое и математическое обеспечение АСК/ Автоматизированная система контроля технического состояния и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП на самолетах ИЛ-76 ( АСК "Алгоритм Д-30КП" )/ Науч.рук.Кулик Н.С., отв.исп.Кучер А.Г. – НАУ НИИА, 2003. -141 с.
7. Разработка информационной базы и программного обеспечения задач первичной и вторичной обработки информации АС «Алгоритм Д-30КП»/ Автоматизированная система контроля технического состояния и сопровождения эксплуатации двигателей Д-30КП на самолетах ИЛ-76 (АСК "Алгоритм Д-30КП") / Науч.рук.Кулик Н.С., отв.исп.Кучер А.Г. – НАУ НИИА, 2003. -103 с.
8. Якушенко О.С. "Нейроні мережі для діагностування ГТД".