

УДК 621.452:681.5

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup.1.13

І. В. ОГАНЯН^{1,2}, С. В. ЄПІФАНОВ²¹ АТ «ФЕД», Харків, Україна² Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ОГЛЯД МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АГРЕГАТІВ ГІДРАВЛІЧНИХ І ПАЛИВНИХ СИСТЕМ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Предметом вивчення у цій статті є методи параметричного діагностування технічного стану агрегатів гідравлічної та паливної систем літального апарату, які дозволяють забезпечувати встановлені показники надійності цих систем протягом усього їх життєвого циклу. Мета роботи - визначення основних вимог і напрямів розробки методів діагностування технічного стану агрегатів гідравлічних і паливних систем на основі аналізу літературних джерел з цієї проблеми. Задача дослідження полягає в класифікації існуючих методів параметричного діагностування, які застосовуються до агрегатів гідравлічних й інших систем, аналіз переваг і недоліків алгоритмів, що розглядаються, виходячи з установлених авторами вимог до алгоритмів діагностування, а також оцінка можливості ефективного застосування цих методологій для діагностування технічного стану складного гідравлічного розподільного агрегату. На основі характеру діагностованих дефектів, досвіду використання алгоритмів діагностування, а також вимог діючих стандартів і аналізу наукових публікацій сформовано основні вимоги до методів діагностування агрегатів гідравлічної й паливної систем повітряного судна. З метою систематизації наявних робіт запропоновано класифікацію алгоритмів параметричного діагностування. У цій роботі описано основні особливості й відмінності алгоритмів діагностування, оснований на методах ідентифікації математичної моделі об'єкту, й алгоритмів діагностування в просторі вимірюваних параметрів. Проаналізовано методи формування діагностичних моделей гідравлічних агрегатів, таких як модель у просторі станів, модель Хаммерштейна, модель Вольтерра, ARX модель, матриця коефіцієнтів впливу. Наведено аналіз використання таких алгоритмів ідентифікації дефектів, як фільтр розділених різниць (DDF), сітка радіальних базисних функцій RBF, метод косинусної відстані. У результаті виявлено переваги й недоліки оглянутих алгоритмів діагностування та сформовано основні задачі розробки алгоритму параметричного діагностування технічного стану складного гідравлічного розподільного агрегату.

Ключові слова: гідравлічна система; паливна система; технічний стан; параметрична діагностика; дефект; гідравлічний агрегат; діагностична модель; алгоритм класифікації; ідентифікація дефекту.

Вступ

Гідравлічні системи (ГС) є важливим компонентом сучасних літальних апаратів (ЛА) та їх двигунів. Вони призначені для керування й передавання потужності в ЛА за допомогою рідини під тиском. ГС зазвичай використовуються для випускання й прибирання шасі, керування закритками й іншими аеродинамічними поверхнями.

До складу ГС ЛА входять такі агрегати, як гідравлічні насоси, гідромотори, виконавчі механізми, гідравлічні акумулятори. Гідравлічні насоси генерують необхідний тиск і витрату робочої рідини, а виконавчі механізми перетворюють гідравлічний тиск робочої рідини на механічну силу для переміщення керувальних поверхонь ЛА. Акумулятори забезпечують постійний тиск у системі й стабільну подачу гідравлічної рідини.

ГС авіаційного двигуна є також дуже важливими для керування польотом. Вони використовуються для керування кроком гвинта, реактивним соплом, реверсивним пристроєм та іншими елементами двигунів. Ці системи також включають гідравлічні насоси, виконавчі механізми й інші вузли, аналогічні до тих, які використовуються в основній ГС ЛА.

Важливим компонентом, що забезпечує функціонування силової установки ЛА, є також паливна система, яка складається з паливних баків, насосів, фільтрів, зворотних і запобіжних клапанів, агрегатів дозування палива.

Безпека польоту значною мірою забезпечується високими показниками надійності систем ЛА [1], які безпосередньо залежать від ефективності технічного обслуговування й ремонту. Відмова будь-якої функціональної частини агрегату ГС спричиняє значне

ускладнення умов польоту або виникнення аварійних ситуацій.

Для забезпечення працездатності агрегату ГС у межах міжремонтного ресурсу й терміну служби із заданою ймовірністю безвідмовної роботи вкрай важливо виконувати своєчасне технічне обслуговування й ремонт до того, як несправності, що розвиваються, переростуть у повномасштабні збої, запобігаючи простоям і підвищуючи загальну надійність [4]. У поточний час найбільш ефективним є обслуговування й ремонт за технічним станом [2, 3], які дозволяють скоротити кількість технологічних операцій, зменшити вартість ремонтного комплексу деталей і знизити витрати, пов'язані з простоями [6].

Однак для застосування цієї ефективної технології необхідно встановлювати різні датчики й контрольне обладнання, що потребує значних затрат [6]. У деяких випадках дані можуть бути недоступними або їх складно збирати та аналізувати [7]. Крім того, для аналізу й інтерпретації даних, зібраних з датчиків, необхідні навчені спеціалісти, що також може викликати певні ускладнення. Тому значну увагу слід приділити розробці точних методів діагностування технічного стану агрегатів ГС, які за умови обмеженої доступності діагностичних даних дозволяють отримати достатньо достовірний діагноз.

Для досягнення максимальної ефективності проектування системи діагностування слід починати сумісно з проектуванням агрегатів ГС [5]. На кожному етапі життєвого циклу ГС система діагностування вирішує певні завдання: перевірка впливу конструктивних рішень на технічний стан насоса-регулятора й прискорення дослідного доведення; керування технічним станом, забезпечення якості продукції й уточнення вимог до систем діагностування в серійному виробництві; керування технічним станом у процесі відновлення якості насоса-регулятора під час ремонту.

У цій статті обговорюються методи параметричного діагностування й локалізації дефектів агрегатів ГС й інших систем, які використовуються на різних етапах життєвого циклу. Описано основні дефекти агрегатів ГС, наведено приклади застосування алгоритмів діагностування в складі комплексних систем керування технічним станом ЛА. Сформульовано вимоги до методів діагностування. В результаті аналізу сформовано завдання з розробки параметричного методу діагностування для розподільного гідромеханічного агрегату.

1. Характерні дефекти агрегатів авіаційних гідравлічних систем

Досвід експлуатації повітряних суден свідчить про те, що для ГС важкого транспортного літака 40%

усіх відмов приходить на агрегати розподільної й регулюючої апаратури [4]. Частина відмов (34%) приходить на порушення герметичності трубопроводів. Остання частина відмов розподілена таким чином: 14% – гідроциліндри й гідромотори, 8% – насоси й насосні станції, 6% – інші гідроагрегати.

Одним із основних видів відмов агрегатів ГС є негерметичність. Приблизно 25...30% від усіх відмов ГС ЛА викликана негерметичністю електромагнітних кранів, золотникових розподільвачів, запобіжних клапанів, насосів, гідропроводів і гідроциліндрів. Значним фактором, який впливає на виникнення негерметичності, є втрата пружних властивостей ущільнень внаслідок впливу низьких, а також високих температур [5].

Причиною виникнення внутрішньої негерметичності агрегатів може бути також потрапляння в зазор золотникової пари гідророзподільвачів забруднюючих часток, які є продуктами зношування деталей агрегатів, продуктами окиснення робочої рідини або сторонніми частками [5].

Забруднюючі частки в робочій рідині приводять до зношування золотникових пар гідророзподільвачів, плунжерних пар насосів і гідромоторів. При цьому зазор у прецизійних парах збільшується, що веде до зменшення об'ємного ККД насосів і зміни регулювань і динамічних властивостей гідророзподільвачів внаслідок збільшення витоків. Сторонні частки при потрапленні в зазор приводять до заклинювання або значного збільшення зусиль на їх переміщення. Заклинювання має раптовий характер, внаслідок чого його дуже складно спрогнозувати.

З часом домішки в робочій рідині можуть спричинити засмічення клапанів і дроселювальних елементів, що веде до зміни регулювань і обмеженої функціональності агрегата.

Дещо рідше виникають дефекти, пов'язані з виходом із ладу агрегатів унаслідок руйнування їх конструктивних елементів. Їхня частина складає 3,5-10% від загальної кількості відмов [4]. У гідравлічній системі частина відмов насосів складає 5-8% [4] від загальної кількості, й більша їх частина зумовлена кавітаційними руйнуваннями.

До руйнувань механічних елементів конструкції агрегату можна віднести зрізання привідного валика, відривання плунжера від підп'ятника, руйнування штоків гідроциліндрів. Розподільні агрегати мають у складі множини механічних елементів (важелі й куліси, рейкові, черв'ячні й шестеренчасті передачі, пружини, а також підшипники), які зношуються в процесі роботи й піддаються втомному руйнуванню. В експлуатації ці дефекти проявляються як збільшення гістерезису, зони нечутливості й статичних похибок регулювання внаслідок утворення люфтів і підвищеного тертя.

Таким чином, гідравлічні й механічні ефекти в агрегатах ГС ЛА можуть суттєво впливати на їх працездатність. Тому своєчасне виявлення, локалізація й усунення дефектів ГС має вирішальне значення для забезпечення їх безпечної ефективної роботи в межах встановленого терміну дії.

2. Використання методів параметричного діагностування в системах керування технічним станом літальних апаратів

Автоматизовані системи діагностування аналізують інформацію по наступних напрямках: контроль стану виробу й локалізація дефектів [8]. Алгоритми діагностування об'єднано в інтегральні системи (рис. 1).

Системи інтегрованого керування станом транспортних засобів (IVHM) використовуються компаніями Honeywell, Pratt&Whitney, Boeing, Bombardier, Embraer і COMAC для контролю стану різних підсистем, включаючи двигуни, авіоніку й елементи конструкції [9]. Дані надходять від датчиків, розміщених по всьому літаку, й передаються до централізованої системи, де вони обробляються й аналізуються. Цей аналіз дозволяє виявляти будь-які аномальні закономірності та тенденції, які можуть указати на потенційні проблеми або перебої в системах літака, спрогнозувати час до відмови, що дозволяє більш ефективно планувати технічне обслуговування, скорочуючи непередбачувані простой і підвищуючи експлуатаційну готовність повітряних суден.

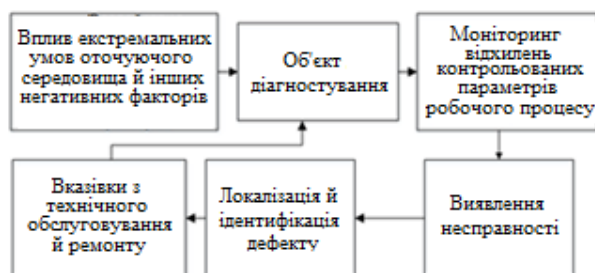


Рис. 1. Функції системи інтегрованого керування станом

Складовою частиною системи IVHM є система керування станом двигуна (Engine Health Management ЕНМ) [10]. Вона представляє собою ієрархічну розподілену інформаційну систему, яка реалізує шість етапів обробки й аналізу інформації: збирання й обробку діагностичної інформації, моніторинг і діагностування технічного стану, оцінку працездатності, прогнозування технічного стану й підтримку прийняття рішень. Система ЕНМ складається з наземних і бортових систем, які працюють у

тандемі через систему зв'язку літака. ЕНМ виконує такі функції: моніторинг стану й діагностування несправностей проточної частини газотурбінного двигуна (ГТД), моніторинг стану оливи, вібрації й ресурсу. Використовуються складні математичні алгоритми, такі як фільтр Калмана, генетичні алгоритми, алгоритми машинного навчання.

У статті [11] представлено аналіз застосування до електрогідравлічного насоса розробленої компанією Boeing системи моніторингу технічного стану відкритої програмної архітектури (Open Software Architectures OSA-CBM), здатної діагностувати такі несправності, як зношування підшипників двигуна або насоса, ударні навантаження й кавітація насоса.

Швидке перетворення Фур'є застосовується до даних акселерометра для визначення стану підшипників насоса й електродвигуна, що дозволяє ідентифікувати зсуви вібраційних частот за плином часу й передбачити зношування підшипників. Нейронні сітки використовуються для виявлення й класифікації явища кавітації насоса. З метою визначення працездатності електрогідравлічного насоса на момент спостереження, його параметри робочого процесу контролюються шляхом порівняння вимірюваних попередньо оброблених даних із заданими пороговими значеннями.

Результати використання цієї системи на таких платформах, як F-18 E/F, бойовий безпілотний літальний апарат і військово-транспортний літак C-17 свідчать про 30-процентне зменшення витрат на технічне обслуговування.

3. Вимоги до методів параметричного діагностування

У стандартах ISO 13374-1, ISO 13374-2 й ISO 13374-4 [14, 15, 16] встановлено ряд вимог до систем моніторингу й діагностування технічного стану обладнання. У роботах [15-17, 22] наведено перелічені нижче вимоги до алгоритмів діагностування:

Точність діагностування. Якість діагностування при визначенні несправностей можна охарактеризувати двома типами похибок: хибні тривоги й пропущені несправності. Алгоритми розпізнавання несправностей характеризуються множиною типів похибок, які можна описати у вигляді матриці достовірності, кожний ij -й елемент якої відповідає ймовірності отримання діагнозу D_j при фактичному стані S_i .

Адаптивність до умов роботи й використовуваному обладнанню.

Швидкість обробки даних. Методи діагностування мають бути здатні обробляти дані й подавати результати в реальному часі або з мінімальною затримкою.

Робастність (стійкість) до шуму й відхилень у вимірюваних даних, а також умовам використання.

Простота використання. Методи діагностування мають бути простими у використанні й інтерпретації для операторів і технічного персоналу.

Підтримка прийняття рішень. Методи діагностування мають надавати корисну інформацію, яка однозначно інтерпретується обслуговуючим персоналом при прийнятті рішень про технічне обслуговування й ремонт виробу.

4. Класифікація методів параметричного діагностування

Методам діагностування, оснований на аналізі параметрів робочого процесу, притаманно деякі характерні відмінності, які в сукупності визначають особливе місце цих методів у системі контролю стану об'єкту. Діагностичні інформація міститься в значеннях параметрів робочого процесу об'єкта, які зареєстровано при його роботі.

Для класифікації методів параметричного діагностування їх систематизують по декількох ключових ознаках, які характеризують алгоритми діагностування. У цьому огляді класифікацію виконано за типом використовуваної апріорної інформації про стан об'єкта (експериментальна чи модельна), за типом математичної моделі (ММ) об'єкта дослідження (лінійна чи нелінійна) й за способом локалізації несправності. Така класифікація основана на роботах А. М. Ахмедзянова [18], І. І. Лободи [30], а також на оглядах методів діагностування авіаційних двигунів [19] і електромеханічних приводів [20].

Згідно з рис. 2, методи обробки вихідної інформації, що використовуються з метою локалізації несправностей, можна розділити на два основних класи: методи, які працюють із експериментальною апріорною інформацією про об'єкт, і методи, які використовують ММ. Для великої кількості агрегатів ГС, зокрема розподільних пристроїв, не існує систематизованої бази даних дефектних станів, а створення такої бази ускладнено випадковим характером дефектів, що виникають, багато з яких проявляються достатньо рідко. Тому при огляді методів параметричного діагностування основну увагу буде приділено методам, оснований на використанні ММ робочого процесу. Серед них відокремимо два основні напрями: параметричне діагностування, основане на ідентифікації ММ, і діагностування в просторі параметрів робочого процесу.

5. Огляд методів параметричного діагностування

5.1. Методи параметричного діагностування, оснований на ідентифікації ММ

Методи цього напрямку реалізуються в дві стадії. На першій стадії, використовуючи ММ, на основі вимірюваних параметрів робочого процесу оцінюють внутрішні конструктивні параметри агрегату, недоступні для вимірювання, такі як жорсткість пружин, площі прохідних перерізів регулюючих елементів та положення клапанів. Ці дані дозволяють досить точно описати можливі несправності виробу, що досліджується. Для отримання даної інформації використовується апарат параметричної ідентифікації.

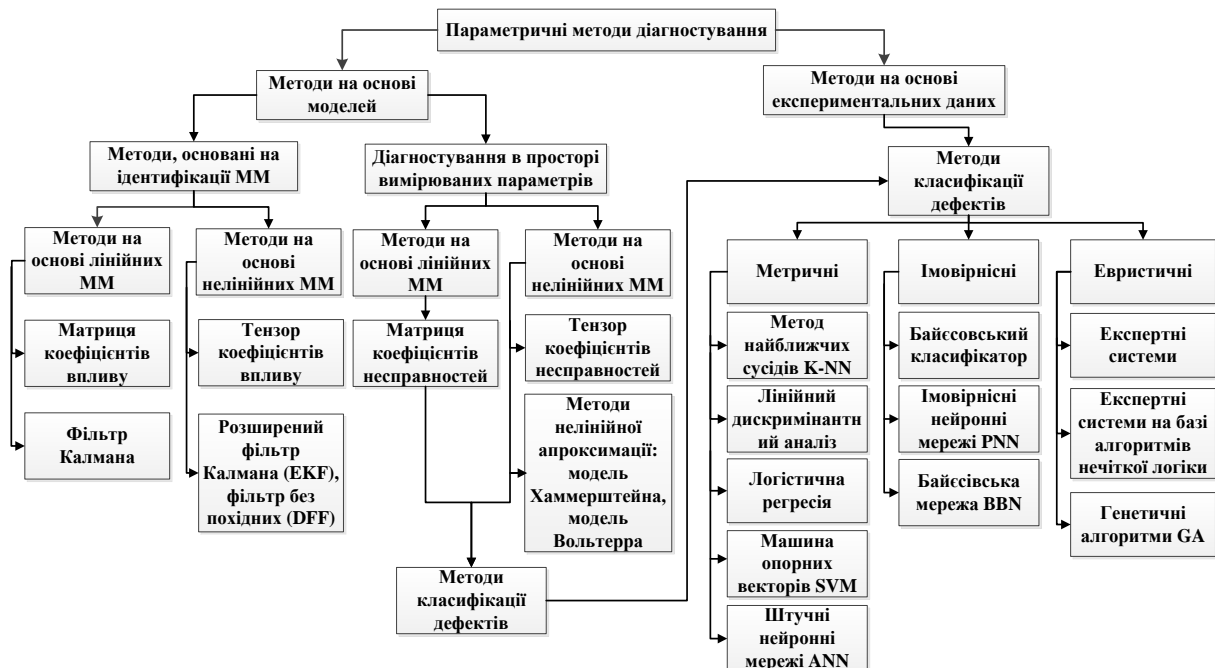


Рис. 2. Класифікація методів параметричного діагностування

На другій стадії діагностування, ґрунтуючись на оцінках, отриманих у процесі параметричної ідентифікації моделі агрегату, приймається рішення щодо відповідності технічного стану об'єкта одному із задалегідь визначених класів дефектів. Цей етап необхідний для досягнення кінцевої мети діагностування – визначення конкретного типу дефекту. Однак цей етап ще недостатньо вивчений. Автори більшості досліджень або обмежують завдання діагностування визначенням оцінок параметрів стану [21, 22], або формулюють завдання другого етапу надто розпливчасто для його практичної реалізації. Розглянемо докладніше першу стадію діагностування.

ММ будь-якої ГС описується одними й тими ж законами гідравліки, однак існує безліч видів перетворення даної ММ з метою спрощення завдання технічного діагностування ГС і агрегатів, що входять до її складу.

У роботі [21] розглядається метод діагностування технічного стану ГС із використанням еталонних залежностей і динамічних портретів, який полягає у порівнянні динамічних параметрів несправної ГС з параметрами справної ГС при тих же контрольних і збурювальних впливах. Як найбільш типові несправності ГС у цій статті розглядаються зовнішні та внутрішні витіки, погіршення властивостей робочого тіла, заклинювання золотникових пар. Дані несправності моделюються за допомогою ММ гідроциліндра та використовуються для дослідження зміни динамічних характеристик. ММ представлена у вигляді гідромеханічного ланцюга, що складається з ідеалізованих активних та пасивних елементів із зосередженими параметрами стану. Загальне рівняння гідромеханічного ланцюга будується на підставі балансу витрат рідини Q

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (1)$$

де n – кількість каналів, що входять до вузлової точки гідромеханічного ланцюга.

Ефективний метод діагностування з точки зору реалізації та впровадження в експлуатацію наведено у статті [22]. Гідросистема складається з гідроциліндра та пропорційного клапана. ММ у просторі станів представлена системою нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку. Вхідними параметрами $u(t)$ є тиск робочої рідини на вході та навантаження на привід. Параметрами стану $x(t)$ є тиск навантаження, переміщення та швидкість переміщення гідроциліндра, переміщення золотника пропорційного клапана:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t); \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t), \end{cases} \quad (2)$$

де $u(\cdot)$ – вектор вихідних параметрів;

A, B, C, D – матриці коефіцієнтів.

Несправності (внутрішні витіки та тертя гідроциліндра) введені у ММ ГС у вигляді невідомих параметрів стану, для ідентифікації яких використовується нелінійний фільтр DDF.

Фільтр розділених різниць (DDF) – це алгоритм нелінійної фільтрації. На відміну від алгоритмів лінійної фільтрації, при його застосуванні проводиться апроксимація другого порядку нелінійної системи в околиці оцінки поточного стану. При цьому процес лінеаризації за допомогою розкладання в багатовимірний ряд Тейлора спрощений шляхом заміни похідних розділеними різницями.

В алгоритмі DDF стан системи моделюється як функція її попереднього стану й керуючих вхідних даних. Алгоритм оцінює поточний стан системи шляхом рекурсивного оновлення оцінки стану на основі останніх вимірювань та передбачуваного стану на попередньому кроці часового ряду. В якості параметрів вимірювання використовуються тиск навантаження, переміщення і швидкість переміщення гідроциліндра, переміщення золотника пропорційного клапана.

Алгоритм DDF має кілька переваг порівняно з іншими алгоритмами фільтрації, такими як розширений фільтр Калмана (ЕКФ): він може обробляти сигнали, згенеровані нелінійними системами з негаусовим розподілом ймовірності похибок вимірювань, і не вимагає розрахунку матриці Якобі для апроксимації системи нелінійних рівнянь. Вагомою перевагою алгоритму DDF є те, що його можна використовувати у ситуаціях, коли модель системи є суттєво нелінійною, а також із зашумленими чи неповними спостереженнями.

Однак він не може бути оптимальним алгоритмом для ідентифікації ММ, оскільки його основною метою є оцінювання не параметрів моделі, а значень функції, що розраховується за допомогою моделі.

Основним недоліком цього методу діагностування ГС є неможливість його застосування для систем з низькою спостережуваністю. Наприклад, регулятор палива має у своєму складі більше десяти взаємопов'язаних рухомих елементів, кожен з яких має свій набір параметрів стану, які неможливо виміряти. Для діагностування дефектів за допомогою алгоритму нелінійної фільтрації, враховуючи високий рівень нелінійності поведінки паливного регулятора, виникає потреба у вимірюванні достатньої кількості параметрів стану, таких як переміщення та швидкості

переміщення золотників, що в багатьох випадках здійснити неможливо.

Існує інший підхід до діагностування ГС із використанням нелінійної параметричної ідентифікації. У статті [23] запропоновано метод параметричної ідентифікації ММ тертя штока гідроциліндра по елементах ущільнювачів гідроциліндра. Оскільки тертя - це складний нелінійний фізичний процес, який залежить від якості обробки поверхні, що ущільнюється, температури, в'язкості робочої рідини і т.і., в даній роботі запропоновано використовувати емпіричний підхід до ідентифікації моделі. Досліджувана система складається з рухомого гідроциліндра, шток якого ущільнюється сальником. Вхідним параметром є швидкість переміщення штока гідроциліндра, вихідним параметром – зусилля з подолання сил тертя. Обидва параметри вимірюються.

Емпірична ММ гідроциліндра являє собою модель Хаммерштейна (3), що складається з функції статичної нелінійності, яка описує статичні властивості ідентифікованої системи, й лінійної передавальної функції, що описує динаміку системи:

$$f[k] = H(q^{-1})g(v[k]), \quad (3)$$

де q^{-1} – оператор відставання;

$H(q^{-1})$ – передавальна функція лінійної частини;

$v[k]$ і $f[k]$ – вхідний і вихідний сигнали моделі відповідно в момент часу k .

Функція статичної нелінійності $g(\cdot)$ відображає залежність вихідного сигналу гідравлічної системи від вхідного, а передавальна функція $H(q^{-1})$ представляє динамічну поведінку системи. Модель Хаммерштейна зазвичай використовується для моделювання нелінійних систем із лінійною динамікою. Базисна функція вейвлета Добеші використовується для представлення нелінійного відображення функції статичної нелінійності $g(\cdot)$ з меншою кількістю параметрів. Лінійна динамічна частина моделі Хаммерштейна представлена у вигляді фільтра ковзного середнього (4):

$$H(q^{-1}) = a_0 + a_1q^{-1} + \dots + a_Nq^{-N}. \quad (4)$$

З метою підвищення точності ідентифікації та компенсації різниці між теоретичною моделлю й фактичною залежністю швидкість/тертя, модель Хаммерштейна була паралельно доповнена фізичною нелінійною моделлю у просторі станів.

Щоб оцінити коефіцієнти емпіричної та змішаної моделі тертя за вимірюваними вхідними та вихідними параметрами, використовується метод мінімальної середньоквадратичної похибки (LMS).

Отримані в роботі результати показали, що розрахункове значення сили тертя в манжетному ущільненні досить добре збігається з фактичним значенням. Однак існують дві основні проблеми, пов'язані із застосуванням даного методу до агрегатів ГС. По-перше, залишається невирішеною задача фізичної інтерпретації коефіцієнтів емпіричної моделі Хаммерштейна з метою подальшої класифікації дефектів за кількісними значеннями отриманих коефіцієнтів. Застосування фізичних залежностей зусилля тертя від швидкості руху гідроциліндра в змішаній моделі тертя вирішує проблему інтерпретації, оскільки після сходження цільової функції буде отримано не тільки коефіцієнти базисної функції вейвлета Добеші, а й коефіцієнти теоретичної моделі тертя, які мають фізичний зміст. Другою невирішеною проблемою застосування даного методу є той факт, що в гідравлічних агрегатах розподільного типу неможливо виміряти без їх розбирання сили тертя, що діють, а також швидкості переміщення рухомих елементів. Невирішеною залишається також задача вибору вимірюваних параметрів робочого процесу агрегату, необхідних для ідентифікації інших параметрів стану, таких як жорсткості пружин, витоки, засмічення тощо.

Особливістю гідравлічних агрегатів розподільного типу, в тому числі паливних регуляторів, є велика кількість рухомих і нерухомих конструктивних елементів, які функціонально різною мірою впливають на параметри робочого процесу. Однак кількість параметрів робочого процесу, доступних для вимірювання, є дуже обмеженою через конструктивні особливості даних агрегатів. До того ж ступінь впливу конструктивних елементів на відхилення вимірюваних параметрів у багатьох випадках може бути дуже схожою. Таким чином, задача параметричної ідентифікації ММ стає слабо обумовленою [8], що значно ускладнює процес ідентифікації та подальшу класифікацію технічного стану. Для вирішення задачі діагностування в умовах низької обумовленості застосовують в основному два підходи - це регуляризація процесу параметричної ідентифікації або діагностування в просторі параметрів, що вимірюються [30]. Методи діагностування, що використовують алгоритми параметричної ідентифікації, мають деякі недоліки, наявність яких значно ускладнює процес діагностування гідравлічних розподільних агрегатів:

а) помилки вимірюваних параметрів і помилки ММ призводять до великих похибок в оцінках параметрів стану через низьку обумовленість задачі;

б) при врахуванні додаткової апріорної інформації про можливі дефекти існує проблема підбирання коефіцієнтів регулювання мінімізованого функціоналу [30].

Таким чином, регуляризація задачі параметричної ідентифікації може не дати очікуваної точності діагностування.

Навпаки, процес діагностування в просторі вимірюваних параметрів робочого процесу описується математичним апаратом розпізнавання образів, що дозволяє виключити з процесу діагностування ММ виробу й виключити вплив похибок ММ на результати діагностування. Тоді точність класифікації залежить лише від ступеня унікальності впливу дефектних станів на діагностичні ознаки.

5.2. Методи діагностування у просторі вимірюваних параметрів

Простір, в якому безпосередньо відбувається визначення станів гідравлічного агрегату, назвемо діагностичним, а параметри робочого процесу, що формують цей простір – діагностичними ознаками. Підхід до діагностування як процесу розпізнавання у просторі вимірюваних діагностичних ознак або їх відхилень від норми принципово відрізняється від діагностування з використанням ідентифікації ММ, яке пов'язане із суттєвими похибками оцінювання параметрів стану, одним із джерел яких є сама ММ.

Процедура локалізації дефектів гідравлічного агрегату в просторі параметрів робочого процесу або їх відхилень від норми є задачею розпізнавання образів і організована інакше, ніж процедура, що використовує ідентифікацію ММ. Ця процедура включає такі етапи:

1) **навчання**: на основі інформації про можливі технічні стани гідравлічного агрегату формується еталонний опис кожного класу можливих станів;

2) **прийняття рішення**: значення діагностичних ознак стану порівнюються з еталонними описами, і приймається рішення про належність поточного стану до одного з класів дефекту;

3) **оцінювання** показників якості розпізнавання.

У процесі діагностування на другому етапі ММ не застосовується. Її використання є необхідним на етапі формування класів дефектів за умови недостатньої кількості емпіричних даних про можливі стани об'єкта діагностування.

Таким чином, розпізнавання дефектів у просторі контрольованих параметрів робочого процесу є перспективним напрямом, що дозволяє виключити ММ з процедури діагностування.

У статті [24] наведено метод діагностування несправностей в електрогідравлічних приводах, які зазвичай використовуються в промисловості. Метою

запропонованого методу є виявлення та ізоляція несправних компонентів, що дозволяє підвищити надійність та знизити витрати на обслуговування. ММ системи відображається у вигляді набору нелінійних диференціальних рівнянь, які можна використовувати для моделювання системи з різними відхиленнями конструктивних параметрів. У цій роботі простір вимірюваних параметрів робочого процесу трансформовано за допомогою алгоритмів ідентифікації в простір коефіцієнтів кернфункцій.

Для моделювання поведінки вузла приводу електрогідравлічного циліндра, підданого нелінійним впливам, використовується модель Вольтерра другого порядку, перевагою якої є можливість відобразити нелінійну динамічну поведінку системи.

Коефіцієнти кернфункцій Вольтерра оцінюються за допомогою застосування рекурсивного алгоритму найменших квадратів, який оновлює оцінки коефіцієнтів кернфункцій на основі поточних та попередніх вхідних і вихідних даних системи.

Після ідентифікації моделі Вольтерра автори використовують її для виявлення й локалізації несправностей у блоці приводу електрогідравлічного циліндра. Зокрема, вони використовують коефіцієнти кернфункцій моделі для формування вектора діагностичних ознак H_{sym}^N системи, що нормально

працює. З метою виявлення дефекту, вектор H_{sym}^{Fi} параметрів моделі Вольтера, отриманий при ідентифікації системи з дефектним станом, порівнюють із вектором параметрів моделі H_{sym}^N , який має очікувані значення для справної системи. Порівняння здійснюють за допомогою розрахунку косинусної відстані між векторами H_{sym}^{Fi} і H_{sym}^N . Якщо вектор параметрів H_{sym}^{Fi} дефектної системи значно відхиляється

від вектора параметрів H_{sym}^N справної системи, це вказує на наявність несправності. Для локалізації дефекту авторами використовується матриця впливу фізичних параметрів стану електрогідравлічної системи на параметри моделі Вольтера, які у цьому випадку використовуються як діагностичні ознаки. Дана матриця отримана шляхом моделювання дефектних станів системи за допомогою її фізичної ММ та подальшої ідентифікації за допомогою моделі Вольтера. Таким чином, вектор діагностичних ознак H_{sym}^{Fi} , отриманий при ідентифікації системи з дефектним станом F_i , порівнюють за допомогою косинусної відстані з кожним з векторів параметрів моделі Вольтера H_{sym}^{Fj} із можливим дефектним станом F_j .

Автори демонструють ефективність такого підходу

шляхом виявлення та розпізнавання несправностей у блоці приводу електрогідравлічного циліндра в різних умовах експлуатації.

Ефективність методу перевірялася на модельованому електрогідравлічному приводі, де вводилися різні несправності, такі як затинання клапана, витік у насосі та тертя в циліндрі. У статті демонструється, що запропонований метод може точно виявляти та локалізувати ці несправності навіть за наявності шуму вимірів та невизначеностей моделювання.

Однак модель Вольтерра має обмежене застосування для діагностування несправностей у випадках, коли є статичні дефекти з обмеженою кількістю вимірюваних параметрів робочого процесу. Модель Вольтерра вимагає значного об'єму даних для опису нелінійної системи та обчислювальних ресурсів для точного оцінювання її параметрів. Якщо кількість вимірюваних діагностичних ознак дуже обмежена, результуюча модель може не відобразити всю складність системи, що призведе до неточних або неповних діагнозів. Крім того, якщо діагностичні параметри недостатньо чутливі до конкретних типів несправностей, можуть виникнути труднощі з виявлення та діагностування несправностей з використанням даної моделі. У таких випадках може знадобитися розгляд альтернативних методів діагностування або збирання додаткових даних для підвищення інформативності діагностичних ознак. Також запропонований у цій роботі алгоритм діагностування дефектів не відображає ймовірність їх виникнення, що значно ускладнює процес діагностування.

Частково недоліки діагностування, ґрунтованого на визначенні косинусної відстані між векторами параметрів моделі Вольтерра для справного та несправного станів, усунуті в статті [25], де представлено метод виявлення й локалізації несправностей гідравлічного сервоприводу з використанням моделі ARX і нейронної мережі радіальних базисних функцій (RBF). Коефіцієнти моделі ARX, що оцінюються методом найменших квадратів, використовуються як вектор діагностичних ознак для виявлення несправностей, а нейронна мережа RBF використовується для класифікації несправностей.

Модель ARX є простішою моделлю порівняно з моделлю Вольтерра, оскільки вона відображає лише взаємозв'язки першого порядку між вхідним та вихідним сигналами гідравлічної системи. Однією з основних переваг ARX моделі є те, що для її ідентифікації потрібен менший об'єм даних, ніж для моделі Вольтерра, яка вимагає більше даних через її складність. При цьому з практики застосування ARX моделей для побудови систем керування гідравлічними сервосистемами моделі даного типу мають достатній рівень складності для відображення взаємозв'язків між вхідними і вихідними параметрами.

У даній роботі класифікація несправностей здійснюється за допомогою нейронної мережі RBF таким чином, що оптимальна межа між дефектами визначається в результаті мінімізації цільової функції. Такий підхід до класифікації є однозначно більш точним, ніж запропонований у попередній роботі евристичний підхід, заснований на використанні косинусної відстані між векторами параметрів. Нейронна мережа RBF має кілька переваг порівняно з іншими типами нейронних мереж, такі як краща збіжність, менша кількість ітерацій, необхідних для навчання, відсутність локальних мінімумів.

Одним з основних недоліків нейронної мережі RBF є складність визначення необхідної кількості прихованих вузлів нейронної мережі, що, в свою чергу, може вплинути на її продуктивність. Крім того, нейронні мережі RBF можуть погано працювати із зашумленими або неповними даними. Нарешті, навчання нейронної мережі RBF може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо великих наборів даних чи складних моделей.

Одним із найбільш суттєвих недоліків даного методу класифікації дефектів, як і методу, описаного в статті [27], є недостатня інтерпретованість результатів оцінок стану внаслідок неможливості визначення ймовірності розпізнавання дефектів, оскільки оцінка RBF є метричною. Це ускладнює процес постановки діагнозу, особливо в умовах отримання подібних оцінок приналежності класифікованого стану до двох або більше класів дефектів.

У сучасній авіації поширені приводи електромеханічного типу (ЕМП). Вони виконують ті ж самі функції, як і авіаційні гідравлічні сервоприводи, і працюють в аналогічних умовах. Тому оцінюванню технічного стану ЕМП приділяється велика увага, що відображено в ряді робіт [26 - 29].

Як приклад розглянемо роботу [26]. Автори пропонують двоетапний процес діагностування, який поєднує використання ММ та алгоритму дерева рішень. ММ ЕМП представлено у вигляді системи з двох диференціальних рівнянь у просторі станів. ММ ЕМП встановлює зв'язок між такими параметрами стану як кутова швидкість обертання й споживаний приводом струм, які у свою чергу залежать від вхідних параметрів - напруження живлення та моменту навантаження на привід. Потім, за допомогою корпускулярного фільтра, оновлюються оцінки коефіцієнтів ММ, що дозволяє використовувати її для визначення нормальних значень параметрів робочого процесу і отримання таблиці впливу дефектів на параметри робочого процесу. На першому етапі діагностування проводиться Z-test для вимірюваних параметрів робочого процесу ЕМП, що дозволяє визначити, чи виходять контрольовані параметри за межі встановленої норми. У разі наявності відхилень параметрам

надаються відповідні символи "+" або "-", залежно від характеру відхилення (позитивне чи від'ємне відповідно).

Далі вимірні параметри робочого процесу за допомогою алгоритму якісної класифікації порівнюються з параметрами, що моделюються, для різних дефектних станів ЕМП. Цей алгоритм дозволяє локалізувати широкий спектр дефектів, таких як несправність датчиків струму електродвигуна, підвищена температура електродвигуна, несправність датчиків положення приводу.

На другому етапі, якщо за допомогою ММ не вдається локалізувати несправність, застосовується алгоритм діагностування, побудований на основі бази даних діагностичних ознак. У цьому випадку використовується алгоритм дерева рішень, який, ґрунтуючись на інформації, що міститься в таблиці впливу дефектів на параметри робочого процесу, дозволяє розділити групу дефектів-претендентів у просторі діагностичних ознак.

Слід зазначити, що ця методика діагностування вимагає наявності великої бази даних вимірюваних діагностичних ознак, що містять додаткову інформацію про систему, наявність якої дозволить усунути неоднозначність при постановці діагнозу. Однак для паливного регулятора дуже важко знайти доступну для вимірювань групу діагностичних ознак, що дозволяють вирішити проблему значної кореляції ступеня впливу різних дефектних станів на вимірювані параметри робочого процесу.

У всіх описаних у цьому розділі методах діагностування ГС застосовується досить складний математичний апарат, що дозволяє визначати наявність несправності та локалізувати її з прийнятною точністю. Об'єктом дослідження в роботах, що розглядаються, є агрегати ГС, що складаються з сервоклапана й гідروциліндра, а також електромеханічний привід. Системи такого типу широко застосовуються як у загальному машинобудуванні, так і в авіакосмічній галузі через їх високу питому потужність. Тому не дивно, що розроблено низку алгоритмів діагностування гідравлічних та електромеханічних приводів, які дозволяють контролювати та підтримувати їх справний технічний стан в експлуатації. Кожен із описаних алгоритмів має свої переваги, які виражаються у легкості реалізації та у можливості виявлення різних негативних нелінійних ефектів. Однак у жодній із робіт не приділяється достатня увага кількісним показникам ефективності діагностування. У практичних дослідженнях у галузі параметричної діагностики часто застосовуються кількісні показники якості для етапу ідентифікації, а також різні непрямі показники надійності результатів розпізнавання, хоча недосконалість останніх може стати додатковим джерелом похибок.

Рідко використовуються такі важливі показники достовірності, як точність класифікації, повнота, F-міра, а також вірогідність правильного та помилкового діагностування.

Особливо важливо мати отримані з необхідною точністю ймовірнісні оцінки приналежності аналізованого стану системи до того чи іншого класу дефектів у випадку, коли відхилення різних конструктивних параметрів системи, що відповідають дефекту, мають дуже схожий вплив на змінення вимірюваних діагностичних ознак. Імовірнісна оцінка значно спрощує процес встановлення діагнозу й дозволяє оцінити достовірність діагностування. Гідромеханічна система агрегатів розподільного типу складається з великої кількості конструктивних елементів, невідповідність вимогам яких значно впливає на працездатність агрегата. Велика кількість можливих дефектів, схожих за своїм впливом на вимірювані діагностичні ознаки, а також дуже обмежена кількість доступних для вимірювання параметрів робочого процесу, визначають складність процесу діагностування.

Значні досягнення отримані в сфері застосування методів діагностування в просторі параметрів стану до проточної частини газотурбінного двигуна (ГТД). За своєю складністю проточна частина ГТД не поступається таким складним виробам, як агрегат регулювання витрати палива. Задача діагностування ГТД також є слабо обумовленою, а кількість параметрів робочого процесу, що вимірюються, є обмеженою. Так, у роботі [30] наводиться метод діагностування ГТД у просторі термогазодинамічних параметрів. Як об'єкт діагностування авіаційний ГТД є складною нелінійною системою, процес діагностування якої відбувається в умовах обмеженої кількості вимірюваних параметрів робочого процесу Y_i . Описане в цій роботі діагностування здійснюється шляхом класифікації дефектів у просторі термогазодинамічних параметрів Z . Одним з ключових елементів даного методу діагностування є використання лінеаризованої ММ ГТД, яка спрощує розрахунки та скорочує обчислювальні ресурси при збереженні високої точності визначення параметрів робочого процесу. Універсальна всережимна повузлова нелінійна ММ використовується для отримання набору однорежимних лінійних діагностичних моделей за допомогою алгоритму лінеаризації (5), який полягає в послідовному розрахунку значень матриці коефіцієнтів впливу H_{ij} параметрів стану θ_j на параметри робочого процесу:

$$H_{ij} = \frac{Y_i^+ - Y_0}{Y_0} \bigg/ \frac{\theta_j^+ - \theta_0}{\theta_0}. \quad (5)$$

Лінійні моделі є зручними для аналізу, оскільки дозволяють використовувати аналітичні співвідношення для створення алгоритму діагностування, і скоротити час виконання діагностичного алгоритму. У багатьох випадках лінійних моделей достатньо для виконання діагностичних завдань із задовільною точністю.

Система діагностування, описана в цій роботі, оснований на тому принципі, що кожен із класів дефектів специфічно відповідає відхиленню від норми одного чи двох параметрів стану. Кількість параметрів стану, відхилення яких не відповідають нормам, визначає кратність дефекту. Алгоритм класифікації стану для одно- і двократних дефектів базується на теоремі Байєса (6) і полягає в розрахунку умовної ймовірності $P(D|Z^*)$ прийняття рішення про наявність дефекту D при спостереженні вектора вимірюваних параметрів робочого процесу Z^* :

$$P(D_j|\bar{Z}^*) = \frac{P(\bar{Z}^*|S_j) \cdot P(S_j)}{\sum_{j=1}^q P(\bar{Z}^*|S_j) \cdot P(S_j)} \quad (6)$$

Даний алгоритм включає етап визначення області істинних значень діагностичних ознак, спричинених конкретним дефектом, шляхом використання лінійної ММ із заздалегідь заданими відхиленнями параметрів стану, етап завдання функції щільності ймовірності в області, що визначається, і призначення апіорної ймовірності для кожного дефекту. Кожен із множників формули Байєса обчислюється на основі таких припущень: розподіл густини ймовірності вимірюваних параметрів робочого процесу $f(Z^*|Z)$ є випадковим; апіорні ймовірності $P(S)$ виникнення станів S є рівними між собою; розподіл істинних значень діагностичних параметрів $f(Z|S)$ є рівномірним. На підставі обчислених значень умовної ймовірності $P(Z^*|S)$ за відомої реалізації вектора Z^* для кожного можливого діагнозу D обчислюється ймовірність $P(D|Z^*)$ його прийняття.

В цілому цей алгоритм ефективно визначає технічний стан ГТД і з високою точністю локалізує дефекти. На відміну від розглянутих вище методів діагностування агрегатів ГС, у роботі [30] запропоновано методологію визначення ймовірності постановки правильного діагнозу. Цей показник є ключовим параметром при постановці діагнозу.

Однак для застосування цієї методології при діагностуванні агрегатів ГС необхідно ґрунтовно переробити всі її аспекти. Основою алгоритму є нелінійна ММ, тому необхідно розробити всережимну нелінійну ММ гідравлічного агрегату. При цьому алгоритм лінеаризації ММ також підлягає деякій переробці, оскільки в гідравлічному агрегаті розглядаються

дефекти, які, на відміну від розглянутих у роботі І. І. Лободи, пов'язані з відхиленнями від норми параметрів конструктивних елементів як у бік зростання, так і у бік зменшення. Окремим завданням є визначення конструктивних параметрів, що підлягають діагностуванню, та оцінка можливості розрізнити класи дефектів, що визначає ефективність діагностування.

Висновки

В результаті аналізу наявних методів локалізації несправностей і контролю параметрів гідравлічних агрегатів можна зробити такі висновки:

1) Діагностування є ефективним інструментом інформаційного забезпечення систем підтримки надійності агрегатів ГС.

2) В представлених методах роботах використовується широкий спектр різних алгоритмів діагностування ГС. В умовах відсутності великого масиву емпіричних даних, які відображають проявлення дефектів, що розглядаються, основою всіх методик є нелінійна ММ ГС, яка спроможна відобразити фізику робочих процесів на достатньому для діагностування рівні. Для зручності діагностування методом параметричної ідентифікації або методом класифікації в просторі параметрів станів у кожній із проаналізованих робіт використовується вельми складний математичний апарат, який дозволяє перетворити нелінійну ММ ГС до форми, зручної для застосування алгоритмів локалізації несправностей. Однак жоден з методів, що оглядаються, не дає уявлення про ефективність роботи алгоритмів класифікації станів в умовах наявності обмеженої кількості вимірюваних параметрів робочого процесу.

3) У роботах, пов'язаних із дослідженням алгоритмів класифікації станів агрегатів ГС у просторі параметрів стану, не даються ймовірнісні оцінки приналежності поточного стану виробу до того чи іншого класу, що значно ускладнює процес постановки діагнозу в разі отримання близьких оцінок приналежності поточного стану до різних дефектів. У свою чергу, наведені оцінки ефективності діагностування мають вельми суб'єктивний характер, оскільки жоден із методів не надає критеріїв якості діагностування, таких як вірогідності діагнозів.

4) Розглянутий метод діагностування проточної частини ГТД дає ймовірнісні оцінки стану, в ряді робіт подається методологія визначення якості діагностування. Однак цей алгоритм базується на абсолютно іншій ММ досліджуваного виробу, яка описує інші фізичні процеси. Також повністю відрізняється склад діагностованих параметрів стану, параметрів робочого процесу, а також характер взаємозв'язків між ними.

Відповідно, для виконання перелічених функцій інтегральних систем оцінювання технічного стану, урахувавши складність фізичної природи дефектів, що виникають в агрегатах ГС, і недоліки наявних методів діагностування, можна сформулювати основні задачі розробки алгоритмів діагностування для складних гідравлічних агрегатів, наприклад, паливного регулятора:

- Розроблення нелінійної динамічної всережимної гідромеханічної ММ агрегату, здатної повною мірою відтворювати всі режими роботи виробу, на яких виконується контроль параметрів.

- Розроблення методики лінеаризації нелінійної ММ паливного регулятора для зручності її використання з метою діагностування. Для цього методу має бути виконано оцінку похибок лінеаризації й області застосування лінійної діагностичної моделі.

- Розроблення алгоритму діагностування несправностей агрегату на базі його лінійної діагностичної ММ, який є здатним ефективно локалізувати несправності в умовах наявності обмеженої кількості вимірюваних параметрів робочого процесу. При цьому алгоритм має оперувати ймовірнісними оцінками технічного стану виробу, за допомогою яких можна визначити показники достовірності діагностування. Для цього алгоритму має бути оцінено показники його ефективності з використанням тестових вибірок. Реальну ефективність розробленого алгоритму можна оцінити за результатами діагностування, отриманими під час проведення натурних досліджень у процесі виробництва, ремонту чи експлуатації.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **С. В. Єпіфанов, І. В. Оганян**; дослідження характеристик несправностей гідромеханічних систем – **І. В. Оганян**; огляд інформаційних джерел – **І. В. Оганян, С. В. Єпіфанов**; аналіз результатів та формування висновків – **С. В. Єпіфанов, І. В. Оганян**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1994-12-28]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1995. 91 с.
2. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. [Действителен от 2017-09-01]. ISO, 2004. 13 с.
3. Яковлев Е.И., Иванов В.А., Шибнев А.В., Матросов В.И. Модели технического обслуживания и ремонта систем трубопроводного транспорта. Москва: ВНИИОЭНГ, 1993. 276 с.

4. Баишта Т.М., Бабанская В.Д., Головки Ю.С. и др. Надежность гидравлических систем воздушных судов / под ред. Т.М. Баишты. Москва: «Транспорт», 1986. 280 с.

5. Комаров А.А. Надежность гидравлических систем. Москва: «Машиностроение», 1969. 236 с.

6. A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy / Jeongyun Kim, Yongjun Ahn, Hwasoo Yeo. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2016. Vol. 12, Issue 12. P. 1525-1536. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2016.1149871>.

7. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application / Rosmaini Ahmad, Shahrul Kamaruddin. *Computers & Industrial Engineering*. 2012. Vol. 63, Issue 1. P. 135-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>.

8. Бургер И.А. Техническая диагностика. Москва: «Машиностроение», 1978. 240 с.

9. Integrated Vehicle Health Management Technology and Its Applications in Commercial Aviation / Chang Shuo, Wang Yi. *International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control*. 2017. P. 740-745. DOI: 10.1109/SDPC.2017.145.

10. Design Technology Research of Aircraft Engine Health Management (EHM) Technologies / Wessam Abousada. *Advances in Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 6, Issue 1. P. 9-23. DOI: 10.4236/aast.2021.61002.

11. Condition-Based Monitoring of an Electro-Hydraulic System Using Open Software Architectures / Bala Chidambaram, Daniel D Gilbertson, Kirby Keller. *IEE Aerospace Conference*. 2005. P. 3532-3539. DOI: 10.1109/AERO.2005.1559656.

12. A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems / Michael Pecht, Rubyca Jaai. *Microelectronics Reliability*. 2010. Vol. 50, Issue 3. P. 317-323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.01.006>.

13. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry / J. Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25, Issue 5. P. 1803-1836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.018>.

14. ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011 (ISO 13374-1:2003). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 1: General guidelines. [Действителен от 2003-03-13]. Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2018. 14 с.

15. ГОСТ Р ИСО 13374-2-2018 (ISO 13374-2:2007). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 2: Data processing. [Действителен от 2007-07-09]. Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2018. 26 с.

16. ГОСТ Р ИСО 13374-4-2021 (ISO 13374-4:2015). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 4: Presentation. [Действителен от 2015-

11-19]. Изд. офиц. Москва: Российский институт стандартизации, 2022. 6 с.

17. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods / Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin, Surya N. Kavuri. *Computers and Chemical Engineering*. 2003. Vol. 27, Issue 3. P. 293-311. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-6).

18. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. Москва: «Машиностроение», 1983. 206 с.

19. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities / Amare D. Fentaye, Akilu T. Baheta, Syed I. Gilani, Konstantinos G. Kyprianidis. *Aerospace*. 2019. Vol. 6, Issue 7. N. pag. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace6070083>.

20. A review of fault diagnosis, prognosis and health management for aircraft electromechanical actuators / Zhengyang Yin, Niaoqing Hu, Jiageng Chen, Yi Yang, Guoji Shen. *IET Electric Power Applications*. 2022. Vol. 16, Issue 11. P. 1249-1272. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12225>.

21. Имитационные модели гидравлических агрегатов воздушных судов с учётом характерных неисправностей / Гареев А.М., Попельнюк И.А., Стадник Д.М. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 30-41. DOI: [10.18287/2541-7533-2019-18-1-30-41](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-30-41).

22. Derivative free filtering in hydraulic systems for fault identification / Vishal Mahulkar, Douglas E. Adams, Mark Derriso. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, Issue 7. P. 649-657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.01.003>.

23. Nonlinear system identification of hydraulic actuator friction dynamics using a Hammerstein model / Byung-Jae Kwak, Andrew E. Yagle, Joel A. Levitt. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 (Cat. No.98CH36181)*. 1998. INSPEC Accession Number: 6054012. DOI: [10.1109/ICASSP.1998.681441](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1998.681441).

24. Parametric Fault Diagnosis for Electrohydraulic Cylinder Drive Units / Hong-Zhou Tan, Nariman Sepehri. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*. 2002. Vol. 49, Issue 1. P. 96-106. DOI: [10.1109/41.982253](https://doi.org/10.1109/41.982253).

25. A fault diagnosis method based on parametric estimation in hydraulic servo system / Liu Hongmei, Ouyang Pingchao, Wang Shaopi. *Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Signal Analysis, Measurement Theory, Photo-Electronic Technology, and Artificial Intelligence*. 2006. Vol. 6357. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.717595>.

26. Prognostic Health-Management System Development for Electromechanical Actuators / Edward Balaban, Abhinav Saxena, Sriram Narasimhan, Indranil Roychoudhury, Michael Koopmans, Carl Ott, Kai Goebel.

Journal of Aerospace Information Systems. 2015. Vol. 12, Issue 3. P. 329-344. DOI: [10.2514/1.1010171](https://doi.org/10.2514/1.1010171).

27. Computational framework for real-time diagnostics and prognostics of aircraft actuation systems / Pier Carlo Berria, Matteo D.L., Dalla Vedova, Laura Mainini. *Computers in Industry*. 2021. Vol. 132, Article 103523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeind.2021.103523>.

28. Diagnostics of actuation system by Hadamard product of integrated motor current residuals applied to electro-mechanical actuators / Sreedhar Babu G, Sekhar A.S., Lingamurthy.A. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2019. Vol. 10, Issue 1. N. pag. DOI: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2019.v10i1.2754>.

29. A model-based approach to prognostics and health management for flight control actuators / Carl S. Byington, et. al. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2004. Vol. 6. P. 3551-3562. DOI: [10.1109/AERO.2004.1368172](https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368172).

30. Лобода И.И. Повышение надежности авиационных ГТД путем оптимизации системы диагностирования по критериям достоверности: дис. ... канд. техн. наук: Харьков, 1994. 267 с.

References

1. DSTU 2860-94. *Nadijnist` texniki`. Terminy` ta vy`znachennya* [Reliability of equipment. Terms and definitions]. [Effective from 1994-12-28]. Official edition Kyiv, State Standard of Ukraine, Publ., 1995. 91 p.

2. GOST 18322-2016. Sistema tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta tehniki. Terminy i opredeleniya [The system of maintenance and repair of equipment. Terms and Definitions]. [Effective from 2017-09-01]. ISO, Publ., 2004. 13 p.

3. Jakovlev E.I., Ivanov V.A., Shibnev A.V., Matrosov V.I. *Modeli tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta sistem truboprovodnogo transporta* [Models of maintenance and repair of pipeline transport systems]. Moscow, VNIIOJeNG, Publ., 1993. 276 p.

4. Bashta T.M., Babanskaja V.D., Golovko Ju.S et al. *Nadezhnost' gidravličeskikh sistem voz-dushnyh sudov / pod red. T.M. Bashty* [Reliability of aircraft hydraulic systems]. Moscow, «Transport», Publ., 1986. 280 p.

5. Komarov A.A. *Nadezhnost' gidravličeskikh sistem* [Reliability of hydraulic systems]. Moscow, «Mashinostroenie», Publ., 1969. 236 p.

6. A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy / Jeongyun Kim, Yongjun Ahn, Hwasoo Yeo. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2016. Vol. 12, Issue 12. P. 1525-1536. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1149871>.

7. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application / Rosmaini Ahmad, Shahrul Kamaruddin. *Computers & Industrial Engineering*. 2012. Vol. 63, Issue 1. P. 135-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>.

8. Birger I.A. *Texnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, «Mashinostroenie» Publ., 1978. 240 p.
9. Integrated Vehicle Health Management Technology and Its Applications in Commercial Aviation / Chang Shuo, Wang Yi. International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control. 2017. P. 740-745. DOI: 10.1109/SDPC.2017.145.
10. Design Technology Research of Aircraft Engine Health Management (EHM) Technologies / Wessam Abousada. *Advances in Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 6, Issue 1. P. 9-23. DOI: 10.4236/aast.2021.61002.
11. Condition-Based Monitoring of an Electro-Hydraulic System Using Open Software Architectures / Bala Chidambaram, Daniel D Gilbertson, Kirby Keller. *IEE Aerospace Conference*. 2005. P. 3532-3539. DOI: 10.1109/AERO.2005.1559656.
12. A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems / Michael Pecht, Rubyca Jaai. *Microelectronics Reliability*. 2010. Vol. 50, Issue 3. P. 317-323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.01.006>.
13. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry / J. Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25, Issue 5. P. 1803-1836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.018>.
14. *GOST R ISO 13374-1-2011* (ISO 13374-1:2003). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 1: General guidelines. [Effective from 2003-03-13]. Official edition Moscow, Standartinform, Publ., 2018. 14 p.
15. *GOST R ISO 13374-2-2018* (ISO 13374-2:2007). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 2: Data processing. [Effective from 2007-07-09]. Official edition Moscow, Standartinform, Publ., 2018. 26 p.
16. *GOST R ISO 13374-4-2021* (ISO 13374-4:2015). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 4: Presentation. [Effective from 2015-11-19]. Official edition Moscow, Russian Institute of Standardization, Publ., 2022. 6 p.
17. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods / Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin, Surya N. Kavuri. *Computers and Chemical Engineering*. 2003. Vol. 27, Issue 3. P. 293-311. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-6).
18. Ahmedzjanov A.M., Dubravskij N.G., Tuna-kov A.P. *Diagnostika sostojanija VRD po termogazodinamicheskim parametram* [Diagnostics of the state of the WJE according to thermogasdynamical parameters]. Moscow, «Mashinostroenie», Publ., 1983. 206 p.
19. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities / Amare D. Fentaye, Aklilu T. Baheta, Syed I. Gilani, Konstantinos G. Kyprianidis. *Aerospace*. 2019. Vol. 6, Issue 7. N. pag. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace6070083>.
20. A review of fault diagnosis, prognosis and health management for aircraft electromechanical actuators / Zhengyang Yin, Niaoqing Hu, Jiageng Chen, Yi Yang, Guoji Shen. *IET Electric Power Applications*. 2022. Vol. 16, Issue 11. P. 1249-1272. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12225>.
21. *Imitacionnye modeli gidravlicheskih agregatov vozdušnyh sudov s uchjotom harakternyh neispravnostej* [Simulation models of aircraft hydraulic units, taking into account typical malfunctions] / Gareev A.M., Popel'njuk I.A., Stadnik D.M. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashino-stroenie*. 2019. Vol. 18, Issue 1. P. 30-41. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-30-41.
22. Derivative free filtering in hydraulic systems for fault identification / Vishal Mahulkar, Douglas E. Adams, Mark Derriso. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, Issue 7. P. 649-657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.01.003>.
23. Nonlinear system identification of hydraulic actuator friction dynamics using a Hammerstein model / Byung-Jae Kwak, Andrew E. Yagle, Joel A. Levitt. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 (Cat. No.98CH36181)*. 1998. INSPEC Accession Number: 6054012. DOI: 10.1109/ICASSP.1998.681441.
24. Parametric Fault Diagnosis for Electrohydraulic Cylinder Drive Units / Hong-Zhou Tan, Nariman Sepehri. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*. 2002. Vol. 49, Issue 1. P. 96-106. DOI: 10.1109/41.982253.
25. A fault diagnosis method based on parametric estimation in hydraulic servo system / Liu Hongmei, Ouyang Pingchao, Wang Shaopi. Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Signal Analysis, Measurement Theory, Photo-Electronic Technology, and Artificial Intelligence. 2006. Vol. 6357. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.717595>.
26. Prognostic Health-Management System Development for Electromechanical Actuators / Edward Balaban, Abhinav Saxena, Sriram Narasimhan, Indranil Roychoudhury, Michael Koopmans, Carl Ott, Kai Goebel. *Journal of Aerospace Information Systems*. 2015. Vol. 12, Issue 3. P. 329-344. DOI: 10.2514/1.I010171.
27. Computational framework for real-time diagnostics and prognostics of aircraft actuation systems / Pier Carlo Berria, Matteo D.L., Dalla Vedova, Laura Mainini. *Computers in Industry*. 2021. Vol. 132, Article 103523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compin.2021.103523>.
28. Diagnostics of actuation system by Hadamard product of integrated motor current residuals applied to electro-mechanical actuators / Sreedhar Babu G, Sekhar A.S., Lingamurthy.A. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2019. Vol. 10, Issue 1. N. pag. DOI: 10.36001/ijphm.2019.v10i1.2754.

29. A model-based approach to prognostics and health management for flight control actuators / Carl S. Byington, et. al. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2004. Vol. 6. P. 3551-3562. DOI: 10.1109/AERO.2004.1368172.

30. Loboda, I. I. *Povyshenie nadezhnosti aviaciomyh GTD putem optimizacii sistemy diagnostirovaniya po kriterijam dostovernosti*. Dis. ... kand. teh. Nauk [Improving the reliability of aviation gas turbine engines by optimizing the diagnostic system based on reliability criteria. Diss. ... cand. tech. sci.] Kharkiv, Kharkiv aviation institute. Publ., 1994. 267 p.

Надійшла до редакції 10.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

REVIEW OF METHODS FOR PARAMETRIC DIAGNOSIS OF AIR VEHICLES HYDRAULIC AND FUEL SYSTEM UNITS

Ihor Ohanian, Sergiy Yepifanov

The subject of study in this article is the methods of parametric diagnostics of the technical condition of the units of an air vehicle's hydraulic and fuel systems, which make it possible to ensure the established reliability indicators of these systems throughout their entire life cycle. This work aims to analyze the existing literature on the methods of parametric diagnostics of hydraulic units, determine the basic requirements for the development of diagnostic methods for units of hydraulic, and fuel systems. The objective of the study is to classify the existing methods of parametric diagnostics, applied primarily to hydraulic systems, to analyze the advantages and disadvantages of the algorithms under consideration based on the requirements for diagnostic algorithms established by the authors, and to assess the possibility of effectively using these methodologies to diagnose the technical condition of a complex hydraulic distribution unit. The authors of this work formed the main requirements for the methods of diagnosing a hydraulic and fuel system's units based on the nature of the detected defects, the experience of using diagnostic algorithms, as well as the requirements of existing standards and scientific publications analysis. The authors developed a classification of parametric diagnostic algorithms to systematize existing works. This paper describes the main features and differences between diagnostic algorithms based on methods for identifying a mathematical model of an object and diagnostic algorithms in the space of measured parameters. Methods for forming diagnostic models of hydraulic units have been analyzed, such as the state-space model, the Hammerstein model, the Volterra model, the ARX model, and the matrix of influence coefficients. Established analysis of the application of defect identification algorithms such as a divided difference filter (DDF), a radial basis functions neural network RBF, and a cosine distance method. As a result, the advantages and disadvantages of the monitored diagnostic algorithms were identified and the main tasks for developing an algorithm for parametric diagnostics of the technical condition of a complex hydraulic distribution unit were formulated.

Keywords: hydraulic system; fuel system; technical condition; parametric diagnostics; defect; hydraulic unit; diagnostic model; classification algorithm; defect identification.

Оганян Ігор Валерійович – інженер-конструктор провідної категорії, АТ «ФЕД»; асп. каф. конструкції та міцності авіаційних двигунів та енергетичних установок, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Єпіфанов Сергій Валерійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет», Харків, Україна.

Ihor Ohanian – Lead Mechanical Design Engineer, JSC FED; PhD Student of the Department of Design and Strength of Aircraft Engines and Power Plants, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: oganyan93@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1197-0160.

Sergiy Yepifanov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Aircraft Engine Design Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: s.yepifanov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0533-9524, Scopus Author ID: 6506749318.