

9. Syryamkin, V. I. Computer-Aided Design of X-Ray Microtomographic Scanners [Text] / V. I. Syryamkin, E. N. Bogomolov, V. V. Brazovsky, A. Sh. Bureev, G. S. Glushkov, A. V. Vasiliev // Advances in Computed Tomography. – 2013. – Vol. 2. – P. 83–90. doi: 10.4236/act.2013.23015
10. Pedagoru, V. M. An Intelligent Feature Recognition Methodology Study for 2.5 D Prismatic Parts [Text] / V. M. Pedagoru, Dr. M. Kumar // International Journal of Computer Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 5, Issue 4. – P. 119–125.
11. Shelldrake, J. Management Theory, 2nd edition [Text] / J. Shelldrake. – Cengage Learning EMEA, 2002. – 272 p.
12. Renna, P. Production and Manufacturing System Management: Coordination Approaches and Multi-site Planning. 1st edition [Text] / P. Renna. – IGI Global, 2012. – 375 p.
13. Единая система конструкторской документации. Межгосударственные стандарты [Текст] / М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 161 с.
14. Норенков, И. П. Основы теории и построения Сапр [Текст] / И. П. Норенков, В. Б. Маничев. – М.: Высшая школа. – 1990. – 335 с.
15. Tanik, U. Architecting Automated Design Systems [Text] / U. Tanik. – VDM Verlag, 2008. – 408 p.
16. Тарасенко, Ф. П. Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем) [Текст] / Ф. П. Тарасенко – Томск: Из-во Том.ун-та, 2004. – 186 с.
17. Gibson, J. How to Do Systems Analysis (Wiley Series in Systems Engineering and Management). 1st edition [Text] / J. Gibson, W. Scherer, W. Gibson. – Wiley-Interscience, 2007. – 360 p.
18. Hoffer, J. Modern Systems Analysis and Design. 6th edition [Text] / J. Hoffer, J. George, J. Valacich. – Prentice Hall, 2010. – 576 p.
19. Greene, J. Industrial Engineering: Theory, Practice & Application: Business and Production Management, Productivity and Capacity [Text] / J. Greene. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. – 412 p.
20. Кузьмин, А. В. Теоретические основы систем управления дискретного действия [Текст] / А. В. Кузьмин. – Ульяновск: ульяновский гос. техн.-ун-т, 2001 – 98 с.
21. Turner, L. Accounting Information Systems: Controls and Processes. 1st edition [Text] / L. Turner, A. Weickgenannt. – Wiley, 2008. – 72 p.
22. Rithie, C. Relational database principles. 2nd edition [Text] / C. Rithie. – London-New York: Continuum, 2002. – 298 p.
23. Atzeni, P. Relational database theory [Text] / P. Atzeni, V. De Antonellis. – Redwood: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1993. – 389 p.

Описані основні задачі діагностики газотурбінного двигуна (ГТД) за технічним станом (ТС). Запропоновано структурний та функціональний опис інтелектуальної автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування (ІСАДРК) режимами роботи ГТД на базі інтеграції нечіткої логіки та нейромереж. Наведено принцип роботи, алгоритм навчання та програмний комплекс гібридної ІСАДРК
Ключові слова: газотурбінний двигун, інтелектуальна система, реконфігурація керування, система діагностування, технічний стан

Описаны основные задачи диагностики газотурбинного двигателя (ГТД) за техническим состоянием (ТС). Предложено структурное и функциональное описание интеллектуальной автоматической системы диагностирования и реконфигурации управления (ИСАДРК) режимами работы ГТД на базе интеграции нечеткой логики и нейронных сетей. Приведены принцип работы, алгоритм обучения и программный комплекс гибридной ИСАДРК
Ключевые слова: газотурбинный двигатель, интеллектуальная система, реконфигурация управления, система диагностирования, техническое состояние

УДК 004.087.5:004.841.3(045)
 DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38088

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

М. П. Кравчук

Кандидат технічних наук, асистент
 Кафедра автоматизації та енергоменеджменту
 Національний авіаційний університет
 пр. Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058
 E-mail: KravchukNP@ukr.net

1. Вступ

Газотурбінні двигуни широко використовують у транспортній і енергетичній галузях. В авіації їх вико-

ристовують як основні і допоміжні рушійні установки; силові установки на морських суднах; в енергогенерувальних агрегатах; вони є практично основним силовим приводом у газоперекачувальних агрегатах.

Ефективність застосування ГТД у будь-якій галузі залежить від їх ТС та економічності в роботі. Натепер одним з перспективних напрямів розвитку систем технічного обслуговування та ремонтів ГТД є перехід до їх експлуатації за технічним станом. У вирішенні цієї проблеми важливе місце займає питання підвищення ефективності процесу визначення поточного стану двигуна та прогнозування тенденцій зміни в часі його параметрів, що характеризують цей стан, тобто діагностування й прогнозування майбутнього стану ГТД. Аналіз публікацій за цією тематикою показав, що за кордоном розробленням та виробництвом багатоканальних автоматизованих комп'ютерних систем діагностування займаються близько 70 відомих фірм, з них близько 40 – у Західній Європі, 17 – у США, 5 – у Японії. В Україні над проблемою підвищення експлуатаційної надійності ГТД працює близько 30 академічних, галузевих, науково-дослідних і проектно-конструкторських установ, вищих навчальних закладів, науково-виробничих та інших підприємств і організацій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Науковому дослідженню підлягає проблема розробки інтелектуальної автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування режимами роботи ГТД на базі інтелектуальних технологій в особливих експлуатаційних ситуаціях. Навчання запропонованої ІСАДРК, та проведення теоретичних і експериментальних досліджень з метою оцінки ефективності її застосування в особливих експлуатаційних умовах [5].

Вирішенням проблеми підвищення надійності функціонування складних динамічних систем та їх складових шляхом розроблення і вдосконалення теорії, методів та засобів технічного діагностування займаються провідні вчені України та зарубіжжя: М. С. Кулик, С. О. Дмитрієв [2], С. В. Єпіфанов [6], С. П. Зарицький, А. Г. Вертепов, В. М. Казак, В. В. Панін [8], Ю. П. Кондратенко, Л. С. Житецький, В. С. Блінцов, Е. В. Бодяньський [1], А. А. Кошевой, Б. І. Доценко [10], D. M. Allen, F.E. Hoerl, R.W. Kennard та ін.

Одним з перспективних напрямів розвитку засобів технічного діагностування є використання у їх складі компонентів штучного інтелекту: продукційних правил, нечіткої логіки, штучних нейронних мереж, гібридних нейро-фаззи архітектур, генетичних алгоритмів [7, 4]. Отже, підвищення економічної ефективності і підтримання високого рівня надійності функціонування газотурбінного приводу на стадії експлуатації в умовах неповної діагностичної інформації на основі розвитку теоретичних основ, методів і засобів інтелектуального діагностування та керування його режимами є актуальною науково-прикладною проблемою [9, 3].

3. Ціль та задачі дослідження

Метою досліджень: інтелектуальна автоматична система діагностування та реконфігурації керування (ІСАДРК) режимами роботи ГТД.

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- удосконалення структурну і функціональну модель ІСАДРК режимами роботи ГТД в особливих експлуатаційних ситуаціях;
- підвищення експлуатаційної надійності ГТД шляхом застосування ефективних методів і засобів оцінки його стану.

4. Структурний та функціональний опис інтелектуальної автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування (ІСАДРК) режимами роботи ГТД на базі інтеграції нечіткої логіки та нейромереж

Під інтелектуальною системою автоматичного діагностування та реконфігурації керування (ІСАДРК) будемо розуміти сукупність методів, алгоритмів і технічних засобів, призначених для класифікації ТС ГТД, та при необхідності зміни режимів його роботи до настання аварійної ситуації. Застосування прогресивних інтелектуальних технологій підвищує ефективність автоматичної системи діагностування, тому що дозволяє оперативно аналізувати різноманітну діагностичну інформацію з особливостей складної ситуації, класифікувати типові несправності, а також розробляти необхідні рекомендації про можливість відстрокового усунення тієї або іншої несправності, а також виробляти оптимальні керуючі рішення з подальшої експлуатації даного ГТД.

Технічна діагностика ГТД на основі інтелектуальних технологій розвивається шляхом розроблення інтегральних систем діагностування, що поєднують комплекс методів і засобів, структура яких будується за умови попереднього досвіду експлуатації й мінімуму невизначеності в розпізнаванні технічного стану двигуна. Така система є динамічною, гнучкою, що дозволяє в процесі її застосування вводити нову діагностичну інформацію у «базу даних» ІСАДРК, діагностичні параметри, вдосконалення, пов'язані з новими методами й засобами діагностування, а також з об'єктом діагностування, використовувати в алгоритмах діагностування ГТД знання й досвід експлуатантів.

Рішення завдання розроблення та впровадження ІСАДРК, дозволить підвищити експлуатаційну надійність ГТД (уникнути виникнення аварійних ситуацій на компресорних станціях, підвищити безпеку польотів) шляхом застосування ефективних методів і засобів оцінки його стану; скоротити працезатрати на технічну експлуатацію; забезпечити безперервний контроль зміни ТС двигуна в умовах експлуатації; запобігти вторинним руйнуванням; скоротити витрати запасних частин; виробляти необхідні керуючі впливи для запобігання переходу аварійної ситуації у катастрофічну [2].

Синтезована структура системи автоматичного діагностування та керування режимами роботи ГТД залежно від його поточного технічного стану зображена на рис. 1, яка включає до свого складу наступні елементи: ГТД, який складається з взаємодіючих підсистем з різними робочими функціями, фізичними процесами й вібраційними станами; виконавчі органи – органи керування ГТД; зовнішні фактори й внутріш-

ні процеси – температура й тиск повітря на вході в ГТД, вологість повітря, теплотворна здатність палива (може періодично змінюватися, наприклад на газоперекачувальній станції), режими роботи двигуна; інтелектуальна система автоматичного діагностування – класифікує технічний стан ГТД; математичні моделі ГТД – будуються відповідно до відомих фізичних законів і математичним їх описом; адаптивна система прийняття рішень – виробляє оптимальні (адаптивні) стратегії керування ГТД, що дозволить автоматично змінити режим функціонування ГТД з урахуванням поточного технічного стану, для зменшення негативного впливу зовнішніх факторів і внутрішніх процесів, а також уникнути виникнення аварійної ситуації.

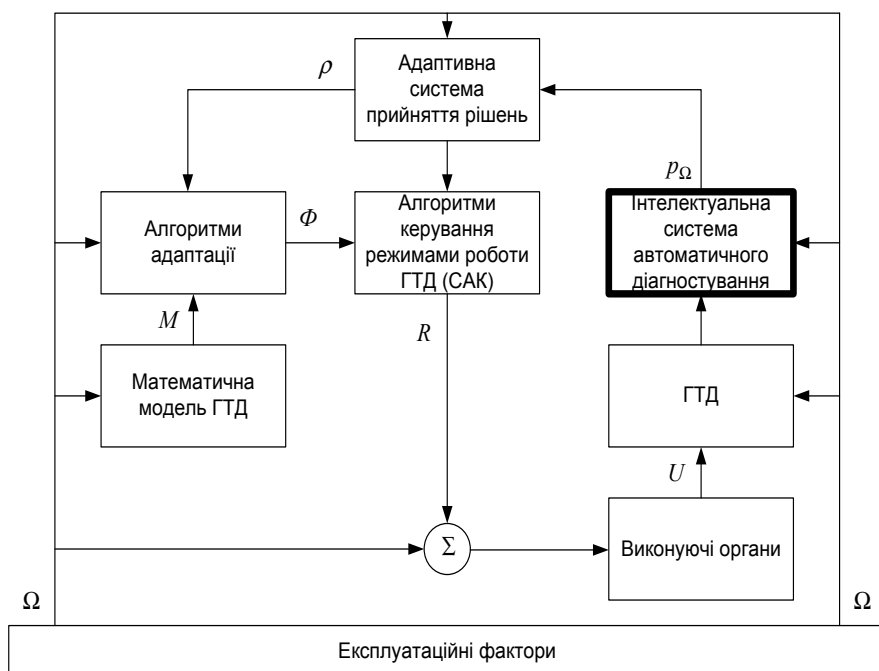


Рис. 1. Структурна схема автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування режимами роботи ГТД в особливих експлуатаційних ситуаціях

У запропонованій системі вібраційні процеси ГТД подамо як адитивну суму кінцевої кількості вузькосмугових компонент $x_i(t)$ та широкосмугового вібраційного шуму, що описується співвідношенням

$$X(t) = x_i(t) + \xi(t). \quad (1)$$

Вузькосмугову компоненту $x(t)$, опишемо рівнянням

$$X(t) = A(t) \sin(\omega_0 t - \phi(t)), \quad (2)$$

де $A(t)$ і $\phi(t)$ – повільно змінюванні функції порівняно з $\sin \omega_0 t$.

Враховуючи рівняння (1) і (2), отримуємо узагальнену математичну модель вібраційних процесів ГТД, яка будується на основі ймовірно-статистичного підходу:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \sin(\omega_0 t - \phi(t)) + \xi(t).$$

Для виявлення закономірних змін вібрації від випадкових сплесків пропонуємо використовувати метод поточного середнього:

$$\hat{X} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

де \hat{X} – згладжені значення вібрації $X(t)$; X_i – результати i -го спостереження; N – кількість спостережень.

У роботі розглянуто сталі режими роботи ГТД, тоді модель ГТД можна подати в класичній формі, що відповідає моделі лінійної системи в просторі станів [6]:

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\bar{U}; \\ \bar{Y} = C\bar{X} + D\bar{U}; \end{cases}$$

де \bar{X} , \bar{U} – вектори стану та керування; \bar{Y} – вектор вимірювання; A , B , C , D – матриці з постійними коефіцієнтами.

Так, ГТД як об'єкт керування в просторі станів опишемо рівнянням:

$$\dot{\bar{X}}(t) = f(\bar{X}(t), \bar{U}(t)). \quad (3)$$

Завдання пошуку необхідного керування для зменшення негативного впливу підвищення вібрації сформулюємо як $\bar{U}(t) = U$, що переводить систему (3) з деякого поточного стану $\bar{X}(t_n) = \bar{X}_n$ у деякий кінцевий (заданий) стан $\bar{X}(t_k) = \bar{X}_k$ за виконання вимоги

$$J = \int_{t_n}^{t_k} dt = t_n - t_k \rightarrow \min, \quad (4)$$

де J – функціонал якості.

Класифікацію поточного вібраційного стану виконано за допомогою міри близькості між виміряними ознаками та еталонними значеннями вібрації:

$$X \in D_j \Rightarrow d_j = \min,$$

де $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ – діагностичні ознаки; D_j – класи вібраційного стану двигуна (добре, прийнятно, допустимо, потребує вжиття заходів, недопустимо), d_j – міра відстані між наборами X і X_{D_j} .

Як заходи близькості використовуємо зважену евклідову відстань

$$d_j(X, X_{D_j}) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \eta^j (X_j - X_{D_j})^2},$$

де η – ваговий коефіцієнт значущості діагностичних ознак.

Мінімальну середню помилку класифікації поточного вібраційного стану ГТД визначаємо за формулою Байеса у такий спосіб [1]:

$$P(D_j / X) = \frac{P(D_j)P(X / D_j)}{\sum_{j=1}^n P(D_j)P(X / D_j)}$$

де $P(X / D_j)$ – імовірність j -го набору діагностичних ознак, що описують стан двигуна D_j ; $P(D_j)$ – апріорна ймовірність класифікації стану D_j . Класифікація достовірна, якщо $P(D_j / X) \geq P_0$, де P_0 – заздалегідь задана ймовірність класифікації.

Оскільки процес зміни ТС ГТД є випадковим, його узагальненою характеристикою є розподіл ймовірностей, який опишемо наступним виразом:

$$p_{\Omega} = (p_0(t), p_1(t), \dots, p_r(t))^T,$$

де $p_r(t)$ – умовна ймовірність знаходження ГТД у стані з номером r при заданих умовах зовнішнього середовища й внутрішніх процесів.

У запропонованій системі автоматично діагностування та керування режимами роботи двигуна, розглядається не одна модель керування M , а деякий клас моделей $M = \{M\}$, щодо якого формується стратегія керування, тобто необхідно створити метамодель керування $M \times I \rightarrow M$, яка формує з множини M найкращу для поточної інформаційної ситуації I математичну модель керування M .

Після того, як обрана модель керування M і сформульована мета керування у вигляді системи показників техніко-економічної ефективності (ТЕ) оцінюваного функціонала R і критерію оптимальності ρ , а також визначені принципи керування $\Phi = \{\phi\}$, може бути сформована стратегія керування режимами роботи ГТД, яка містить у собі:

– модель керування:

$$M \times \Phi \rightarrow \Sigma,$$

$$\Sigma \times p_{\Omega} \rightarrow U,$$

яка для обраної математичної моделі M і прийнятої стратегії керування Φ формує простір можливих стратегій Σ і простір керувань U ;

– модель об'єкта керування :

$$\Omega \times M \times U \rightarrow p_{\Omega},$$

що формує по керуванню U розподіл ймовірностей p_{Ω} , залежно від стану зовнішнього середовища й протікання внутрішніх процесів Ω ;

– модель адаптації керування режимами роботи ГТД:

$$M \times R \times p_{\Omega} \rightarrow M,$$

яка забезпечує корекцію математичних моделей керування, залежно від результатів керування режимами роботи ГТД.

Модель інформаційної системи забезпечує одержання з об'єкта експлуатації вибіркового розподілу $U \times \Omega \rightarrow p_{\Omega}$ і його перетворення в оцінюваний функціонал $p_{\Omega} \times TE \rightarrow R$, що характеризує якість керування ГТД.

Розроблена функціональна та структурна схема автоматичного діагностування й реконфігурації керування режимами роботи ГТД зображена на рис. 2, яка включає до свого складу з'єднання з датчиками 1 контрольованих параметрів пристрій збирання інформації 2 з обмеженою пам'яттю, підключений з мікропроцесором керування ГТД 3, блок зв'язання з обмеженнями 4, блоки приведення параметрів 5, усереднення вимірів 6 і порівняння з базовими значеннями 7 до блоку обчислення діагностичних ознак 8, з'єднаному з блоком 9 розпізнавання несправностей, побудований на основі нейронних мереж, з'єднаним із блоком реєстрації й зберігання інформації 10 як безпосередньо, так і через блок прогнозування зміни ТС ГТД 11 [7].

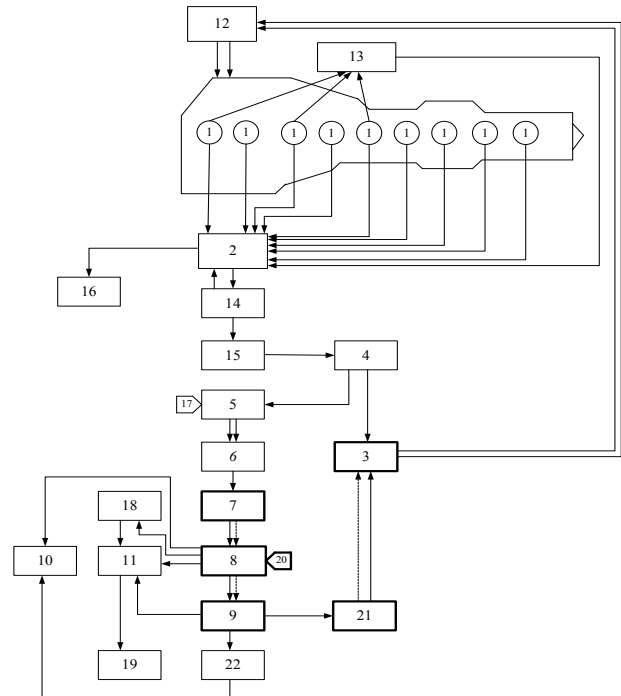


Рис. 2 Функціональна та структурна схема інтелектуальної системи автоматичної діагностування та реконфігурації керування режимами роботи ГТД в особливих експлуатаційних ситуаціях

Мікропроцесор 3 пов'язаний з системою керування ГТД 12. Запропонована функціональна структура також у своєму складі включає реєстратор напруження 13; блоки: перевірки вірогідності діагностичної інформації 14, корекції показів каналів вимірів 15, самоперевірку каналів вимірів 16, обчислювач ознак оперативного діагностування 23; обчислення залишкового ресурсу 18, оптимізації обслуговування й ремонту 19, вибору режиму діагностування 21 і оптимізації режиму керування 22. Блок 8 – пристрій уведення зовнішньої інформації 20. У блоці 9 передбачений банк вирішальних правил у вигляді «якщо (діагностичні ознаки), то (клас поточного ТС двигуна)».

Розглянемо принцип роботи запропонованої системи автоматичного діагностування та керування режимами роботи двигуна. Сигнали від датчиків

1 надходять у пристрій 2 збирання діагностичної інформації в блок напрацювання 13, а також у блок 14 перевірки вірогідності отриманої інформації. У блоці 14 здійснюється фізична фільтрація вимірів шляхом порівняння отриманих значень із робочими діапазонами датчиків. Тут же передбачається перевірка однорідності спостережень і оцінка значимості зміни значень діагностичних параметрів, якщо значимої зміни параметрів не отримано, то сигнали транзитом через блок 5 надходять у блок 4.

Якщо ж зазначена умова не дотримується, то сигнали з блоку 14 повертаються в пристрій 2, а потім надходять у блок 16 самоперевірки каналів виміру для виявлення причин зміни параметрів. У випадку, якщо виявлена зміна режиму у разі відсутності аномальності значень параметрів, то сигнали вертаються в блок 14 і далі без корекції через блок 15 надходять у блок 4 порівняння зі встановленими обмеженнями. Якщо виявлено, що відхилення окремих параметрів не пов'язані зі зміною режиму або ТС двигуна, то видається сигнал щодо необхідності інструментальної перевірки відповідних каналів вимірів і усунення несправностей. До виконання роботи з усунення несправностей наявні систематичні складові похибки усуваються алгоритмічним шляхом у блоці 15.

У мікропроцесорі 3 отримані відхилення порівнюються із гранично припустимими значеннями. З урахуванням отриманої інформації мікропроцесор 3 забезпечує необхідну зміну режиму, що зменшує прояв зазначених несправностей. Наприклад, у разі підвищеної вібрації мікропроцесор 5 прийме рішення щодо зміни частоти обертання в напрямі зниження рівня вібрації. Параметри з більшим інтервалом усереднення із блоку 6 надходять безпосередньо в блок 7 порівняння з еталонними значеннями. У блоці 8 обчислюються відносні відхилення діагностичних ознак, що служать симптомами несправностей. Блок 8 оснащений пристроєм введення зовнішньої інформації 20, що дозволяє враховувати додаткові відомості щодо зміни поточного ТС двигуна.

Інформація із блоку 8 надходить у блок 9 розпізнавання несправностей, а також у блок 11 прогнозування як безпосередньо, так і через блок 18 обчислення залишкового ресурсу. У блоці 9 здійснюється класифікація ТС ГТД з використанням інтелектуальних технологій.

Із блоку розпізнавання несправностей 9 інформація щодо технічного стану ГТД надходить у блок оптимізації режиму функціонування 22, у якому формується інформація щодо оптимального режиму функціонування ГТД із обліком його експлуатаційних особливостей. Ця інформація передається далі в блок реєстрації й зберігання інформації 10.

Інформація щодо ознак оперативного діагностування надходить у блок прогнозування 11 із блоків 8 і 23. Туди ж надходить інформація із блоку 9 розпізнавання несправностей і із блоку 18 обчислення залишкового ресурсу. У блоці 11 проводиться прогнозування часу досягнення відхиленнями динамічних ознак, що відбивають несправності, прояв яких розтягнуто у часі. При цьому інформація, що накопичується у часі за кожною ознакою, статистично обробляється з використанням методів згладжу-

вання. За ознаками оперативного діагностування, ознакам, що характеризують надійність високотемпературних вузлів і лопаток компресора, у блоці 18 розраховується вичерпаний індивідуальний ресурс кожного елемента ГТД або залишковий ресурс (дорівнює різниці встановленого й вичерпаного).

Блок 13 виконує функції, реєстратора напрацювання, а в блоці обчислення залишкового ресурсу 18 обчислюються значення цього показника.

У блоці оптимізації обслуговування й ремонту 19 формується проведення окремих операцій по технічному обслуговуванню ГТД. Запропонована функціональна структура автоматичної системи діагностування та керування режимами роботи ГТД у порівнянні з існуючими системами, завдяки наявності додаткових блоків і зв'язків між блоками, а також використання інтелектуальних технологій, дозволяє відносно підвищити інформативність і точність діагностування поточного ТС ГТД, за рахунок використання:

- автоматичної алгоритмічної перевірки вірогідності й коректування інформації сигналів з датчиків на стадії вимірів;
- можливість введення зовнішньої інформації під час розрахунку діагностичних ознак ГТД;
- використання вирішальних правил, що реалізують позитивний досвід експлуатації даного типу двигуна, під час розпізнавання типових несправностей;
- сполучення імовірнісних і детерміністських методів класифікації несправностей, а також методів інтелектуальної діагностики.

Під час побудови інтелектуальних систем класифікації ТС ГТД у процесі його експлуатації, до яких відносяться й діагностичні системи, необхідно розв'язати такі завдання:

- відбір інформативних ознак (відбір здійснюється на основі попереднього досвіду експлуатації типового ГТД (статистичний аналіз);
- вимір параметрів для діагностування ТС ГТД;
- класифікація ТС ГТД.

У розпізнаванні образів об'єднання множини класифікаторів різної природи використовуємо для розроблення високонадійних систем діагностики й контролю за ТС ГТД. Результати роботи декількох класифікаторів можуть бути об'єднані для поліпшення якості розпізнавання загального ТС ГТД (рис. 3).

Запропонована процедура класифікації ТС ГТД реалізуємо за допомогою такого алгоритму, припустимо, що в розглянутій гібридній системі, яка складається з декількох НМ, є X_j входів і Y_n класів, тоді процедура класифікації технічного стану ГТД реалізує такий алгоритм [2, 5]:

1. Формування навчальної N_0 й тестової N_T вибірки; $N = N_0 + N_T$ – загальне число прикладів, які зберігаються у бази даних запропонованої системи.

2. Кластеризація навчальної вибірки. Ділимо навчальну вибірку на K класів K_s (по числу правил), де $s = 1, 2, \dots, k$. Кожна навчальна підвибірка для класу K_s визначається парою (x_i^s, y_i^s) , де $i = 1, 2, \dots, N_s$, X_i – вхідний вектор, K_i – кількість класів, а N_s – число прикладів у навчальній вибірці для класу K_s .

3. Навчання НМ (μ). Для кожного вхідного вектора ДО $X_i \in K_s$ визначимо вектор функцій прина-

лежності до правила $M_i = (m_i^1, m_i^2, \dots, m_i^k)$ класифікації ТС ГТД, що реалізує алгоритм, у вигляді «якщо (діагностичні ознаки), то (клас ТС ГТД), інакше». Нейронна мережа (радіально-базисна мережа) (μ) з n входами й k класами навчається на парах (X_i, M_i) , $i = 1, 2, \dots, N_0$, тому після навчання й тестування така мережа буде здатна визначити ступінь приналежності m_i^s для кожного вхідного вектора діагностичні ознаки (ДО) ГТД, що належить класу K_s . Таким чином, функція належності до частини «якщо...» правила визначається як вихідна величина m_i^s :

$$m_{A_s}(X_i) = m_i^s, i = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, r,$$

де A_s – відповідає нечіткій безлічі умовної частини s -го правила (ДМ – дуже мала, М – мала, С – середня, В – велика, ДВ – дуже велика).

4. Навчання НМ. Навчальна вибірка із входами $x_{i1}^s, x_{i2}^s, \dots, x_{in}^s$ вихідними класами ГТД K_i , $i = 1, 2, \dots, j$ подається на вхід вихід нейронної мережі (НМ), яка є нейромережевою моделлю частини «... то...» (вібраційний стан ГТД описаний наступними множинами: добре, прийнятно, допустимо, потребує вжиття заходів, недопустимо). За допомогою тестової вибірки обчислюється помилка класифікації ТС ГТД:

$$\epsilon_{\text{кл}} = \sum_{i=1}^{N_T} \{Y_n - m_{A_s}(X_i)\}^2,$$

де $m_{A_s}(X_i)$ – спостережуваний вхід НМ. Якщо $\epsilon_{\text{кл}} < \Delta$, де Δ – апріорно задана величина, то НМ – навчена.

Розроблений програмний комплекс ІСАДРК складається з низки підсистем (рис. 4). Основними з них є:

1) підсистема організації діалогу ІСАДРК з експлуатантом. Ця підсистема забезпечує надання діагностичної інформації, візуалізацію етапів процесу класифікації ТС ГТД, показ інформації з бази класів та результатів функціонування інших підсистем комплексу у зручній для сприйняття диспетчером формі з можливістю побудови графіків, діаграм, графічного зображення моделей ГТД. Від диспетчера не вимагається знання мов програмування високого рівня чи спеціалізованих мов, знання теорії штучного інтелекту, підтримки прийняття рішень чи системного аналізу;

2) підсистема семантичного інтерпретатора, яка здійснює перетворення інформації, введеної користувачем на природній мові у подання, прийнятне для опрацювання ІСАДРК ГТД, а результати рішень системи надаються диспетчеру у зручній для сприйняття формі;

3) підсистема структурного синтезу ІСАДРК, яка дає можливість згенерувати ІСАДРК для кожного окремого типу ГТД, врахувавши особливості його технічного стану, режимів роботи, умов експлу-

тації, засобів одержання діагностичної інформації, цільових завдань;

4) підсистема прогнозування, яка надає прогноз зміни вібраційного стану ГТД на заданий відрізок часу. Прогнозуються технічні стани ГТД, які пропонуються оцінювати якісно у вигляді таких діапазонів: добре, прийнятно, допустимо, потребує вжиття заходів, недопустимо. Завдяки цьому експлуатант своєчасно інформується щодо можливості виходу з ладу складових ГТД (зокрема механічної частини), що дає змогу запобігти аварійній зупинки, за рахунок зміни режиму і тим самим подовжити моторесурс;

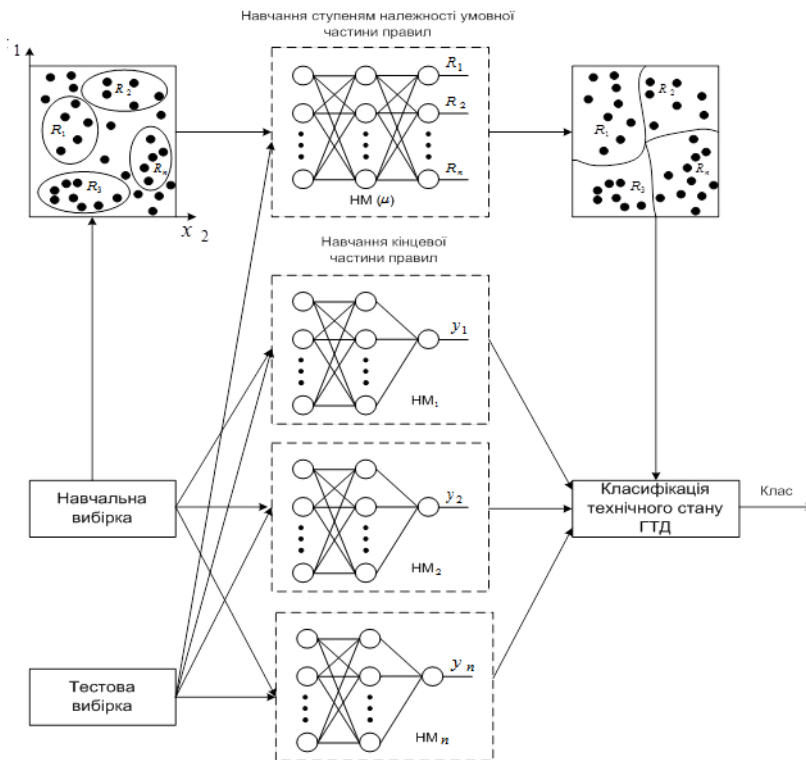


Рис. 3. Структура гібридної ІСАДРК

5) підсистема ідентифікації, яка дозволяє визначити ТС ГТД;

6) база класів, що містить діагностичну інформацію, експертні знання про ТС типового ГТД та процес діагностування, алгоритмічні знання про синтез архітектур нейромережних експертів, процедури обчислення характеристик ГТД;

7) база даних зберігає усі результати роботи програмного комплексу ІСАДРК.

Розроблення лістинг-програм ІСАДРК ГТД здійснювалось в системі моделювання Matlab 7.01. Програмний комплекс працює у середовищі Windows 2000/XP і займає біля 200–250 Мбайт вільного місця (залежно від обсягу діагностичної інформації у базі класів). На рис. 5 показано приклад функціонування розробленої у роботі ІСАДРК, яка дозволяє діагностувати технічний стан ГТД ДР-59Л (підвищення вібрації корпусу КНТ) і автоматично змінювати режим роботи ГТД (рис. 6), з метою зменшення негативного впливу вібрації і повернення її у допустимі нормативні межі.

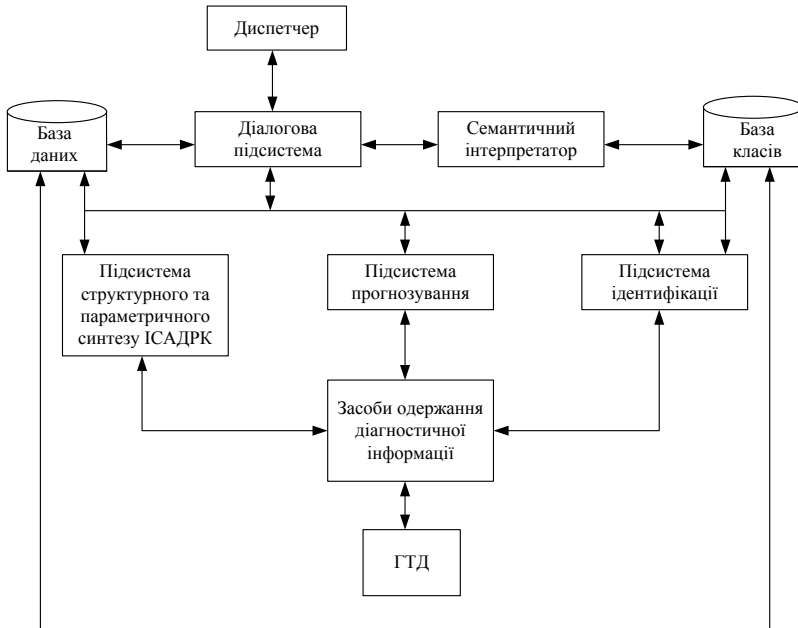


Рис. 4. Узагальнена структура програмного комплексу ІСАДРК ГТД

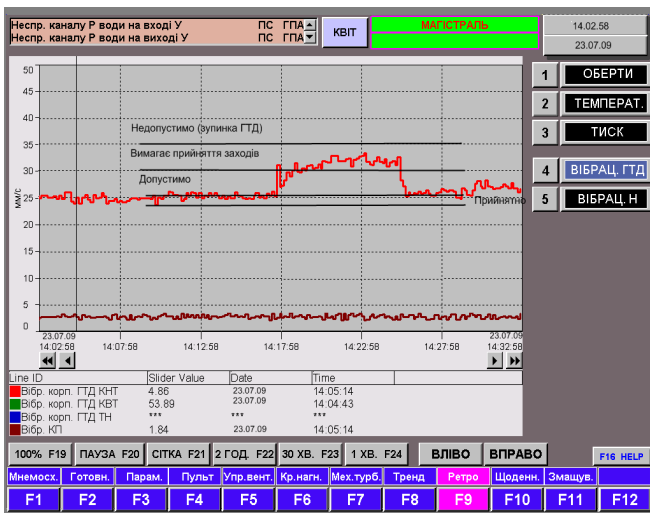


Рис. 5. Зміна вібраційного стану ГТД ДР-59Л у процесі його експлуатації (23.07.2011)

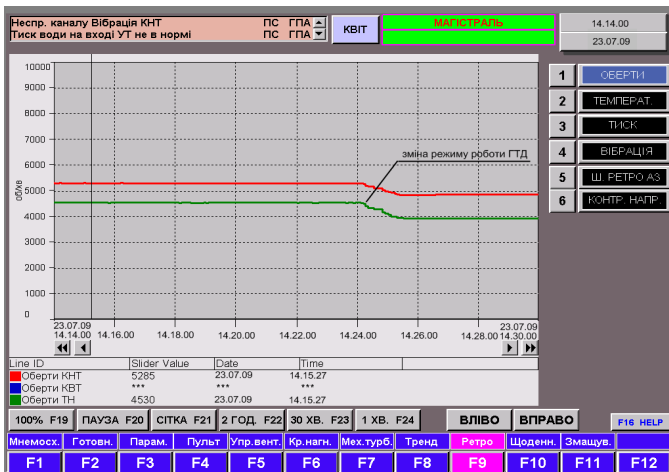


Рис. 6. Зміна режиму роботи ГТД ДР-59Л (23.07.2011)

ІСАДРК ГТД забезпечує надання діагностичної інформації, візуалізацію етапів процесу класифікації ТС ГТД, показ інформації з бази класів та результатів функціонування інших підсистем комплексу графіків, діаграм.

5. Висновки

Удосконалено структурну і функціональну модель ІСАДРК режимами роботи ГТД в особливих експлуатаційних ситуаціях, яка класифікує поточний ТС ГТД та з його врахуванням, у разі потреби, здійснює зміну режиму функціонування двигуна для повернення поточних значень (наприклад вібрації) у допустимий діапазон і тим самим скорочує експлуатаційні витрати.

Пропонується нове програмно-інформаційне забезпечення на основі інтелектуальних технологій, яке дає змогу оперативно оцінити вібраційний стан двигуна та з його врахуванням виконати зміну режимів роботи, для зменшення негативного впливу вібрації. Забезпечує можливість налаштування таких систем для проведення діагностування різноманітних ГТД в процесі їх експлуатації, що сприяє підвищенню достовірності класифікації та прогнозування залишкового ресурсу і відповідно підвищенню ефективності діагностування.

Підвищена експлуатаційна надійність ГТД шляхом застосування ефективних методів і засобів оцінки його стану.

Забезпечено безперервний контроль зміни ТС двигуна в умовах експлуатації, дозволило класифікувати вібраційний стан ГТД ДР-59Л з імовірністю 0,96 і ГТД ДТ-71ПЗ з імовірністю 0,95.

Література

1. Дубровин, В. И. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей [Текст]: монография / В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуслаев, В. К. Яценко. – Запорожье: ОАО «Мотор-Січ», 2003. – 279 с.
2. Гасиджак, В. С. Байесовський алгоритм розпізнавання передвідмовних станів газоперекачувальних агрегатів [Текст] / В. С. Гасиджак, В. М. Казак // Вісник центрального наукового центру ТАУ. – 2007. – Вип. 10. – С. 77–78
3. Епифанов, С. В. Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. М. Богаенко, Г. Г. Грабовский. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
4. Панин, В. В. Способ оценки технического состояния компрессоров ГТД [Текст] / В. В. Панин, И. Ф. Кинащук, В. И. Орланов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2001. – Вип. 26. – С. 236–239.

5. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, применение [Текст] / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
6. Буравлев, А. И. Управление техническим состоянием динамических систем [Текст] / А. И. Буравлев, Б. И. Доценко, И. Е. Казаков. – М.: Машиностроение. 1995. – 240 с.
7. Зарицкий, С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом [Текст] / С. П. Зарицкий. – М.: Недра, 1986 – 198 с.
8. Дмитриев, С. А. Диагностирование проточной части ГТД на установившихся и неустойчивых режимах работы [Текст]: дис. ... д-р техн. наук / С.А. Дмитриев. – К.: КМУГА, 1996. – 358 с.
9. Ротштейн, А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети [Текст] / А. П. Ротштейн. – Винница: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с.
10. Джордж, Ф. Л. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание [Текст] / Д. Ф. Люггер; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.