

УДК 681.3.069:681.3.015

В.О. ІГНАТОВ, Ю.М. ЧОХА, О.І. ЧУМАК

Національний авіаційний університет, Україна

МОДЕЛЬ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Обґрунтовується актуальність інтелектуалізації процесів експлуатації АТ, пропонуються концептуальна та функціональна моделі експертної системи діагностування на прикладі газотурбінного двигуна.

експертна система, газотурбінні двигуни, діагностування, інтелектуальні інформаційні технології

Вступ

Однією з головних задач в галузі експлуатації авіаційної техніки є пошук нових можливостей підвищення ефективності її льотно-технічної експлуатації і технічного обслуговування. Основним напрямком у вирішенні цієї задачі вважається реалізація у повному обсязі стратегії експлуатації повітряних суден і, зокрема, авіаційних газотурбінних двигунів, за їх технічним станом. Такий підхід дозволяє здійснити принципову можливість своєчасного попередження виникнення відмов силових установок за рахунок виявлення передвідмовних станів і керування процесом експлуатації. У залежності від виду несправного стану і ступеню його розвитку здійснюються профілактичні заходи, регулювання параметрів чи заміна елементів (вузлів) відповідної системи. Одночасно зазначений підхід забезпечує істотний ефект за рахунок більш повного використання індивідуальних можливостей кожного конкретного зразка ГТД. Оцінка застосування зазначеної стратегії показує, що витрати на технічне обслуговування ГТД можуть бути знижені на 30% і більше.

Перехід до стратегії експлуатації ГТД за технічним станом неможливий без розвинутої системи технічного діагностування, що є невід'ємною складовою частиною системи експлуатації ГТД.

Постановка проблеми. Однією з головних задач при експлуатації авіаційних ГТД є ефективний контроль їх параметрів і діагностика поточного техніч-

ного стану конструктивних вузлів і елементів протягом усього періоду їх використання за призначенням. Головною особливістю переважної більшості ГТД, що знаходяться в регулярній експлуатації (АІ-20, АІ-24, АІ-25, Д-30 КП(КУ) та ін.), є те, що вони відносяться до типу двигунів з низьким рівнем контролепридатності. Крім того, на борту ПС, що експлуатуються з двигунами низького рівня контролепридатності, засоби об'єктивного контролю не в повній мірі орієнтовані на сучасні інформаційні технології й обчислювальну техніку.

В даний час у реальних експлуатаційних умовах діагноз ставиться авіаперсоналом на підставі визначеного всіма доступними методами і засобами діагностики (аж до інтуїтивних) технічного стану ГТД, виявлення, без конструктивного розбирання, фактичних значень контрольованих параметрів і порівняння їх із допустимими межами відхилень від нормального (номінального) рівня, що відповідає заданим технічним вимогам. Це одна з найбільш складних задач в питаннях експлуатації АТ, що вирішується за допомогою різних автоматизованих (автоматичних) систем діагностування як бортових (типу МСРП, БСКД), так і наземних (типу "Луч-84", "Аналіз-86", "Контроль-8-2У", "Діагноз-90" та інших). Але найбільший розвиток одержують комплексні наземно-бортові діагностичні системи (НБДС) сучасних ГТД підвищеного рівня контролепридатності (наприклад, БСКД-90 для ПС-90А; БАСК-124

для Д-18Т; СКСУ-32 для НК-32 і ін.). Вони передбачають використання бортових автоматизованих підсистем, які працюють у тісному зв'язку з наземними системами діагностики. Однак ефективне рішення проблеми діагнозу (і прогнозу) ТС зразка АТ ускладнюється тим, що бортові та наземні електронні пристрої, що реєструють і накопичують інформацію являють собою розподілену слабкозв'язану обчислювальну систему, що вимагає додаткового розширення й аналізу фахівцями авіапідприємств великого обсягу даних про роботу СУ та функціональних систем, що знижує ефективність процесу їх експлуатації.

Таким чином, застосовані на сучасному етапі розвитку авіабудування методи і засоби контролю і діагностики зразків АТ потребують суттєвих доопрацювань за рахунок використання якісно нових інформаційних комп'ютерних технологій, які базуються на теорії експертних систем, математичних моделей процесів, що виникають в авіадвигунах і функціональних системах ПС, нечіткої логіки і генетичних алгоритмів. До них відносяться інтелектуальні інформаційні технології контролю об'єктів експлуатації, що мають в основі бази концептуальних і експерт-

них знань про даний об'єкт і називаються експертними системами діагностування (ЕСД) [1, 2].

Відомо, що оптимальної ефективності використання методів і засобів діагностики ГТД можна досягти тільки в результаті їхнього об'єднання в єдину інтегральну систему діагностування, яка зможе оперативно та надійно вирішувати задачі щодо своєчасного виявлення несправностей ГТД й оцінювати тенденції щодо зміни його ТС. Саме таку інтегруючу (об'єднуювальну) роль покликана виконувати інтелектуальна експертна система діагностування у сполученні з або існуючою бортовою системою контролю параметрів двигунів низького і середнього рівнів контролепридатності, або з НБДС ГТД підвищеної контролепридатності.

Особливо важливо, щоб діагностична інформація оброблялась оперативно (або на борту в польоті, або в наземних умовах), а у випадку виявлення несправності передавалась в авіапідприємство у випереджальному режимі (рис. 1), а також передавалась в систему управління повітряним рухом і наземні служби ТО.

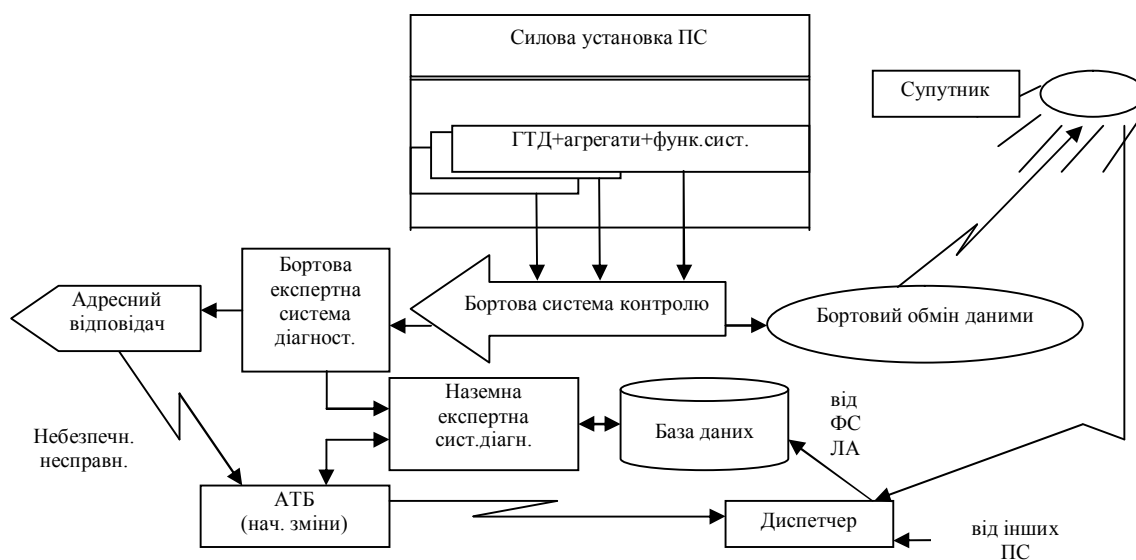


Рис. 1. Схема контролю технічного стану силової установки повітряного судна з використанням інформаційних технологій в умовах експлуатації

ЕСД дозволяють суттєво розширити інформаційну діагностичну базу ГТД за рахунок використання нелінійних математичних діагностичних моделей робочого процесу проточної частини, охопити широкий спектр розв'язання експлуатаційних задач і підвищити ефективність існуючих систем контролю, оперативність і глибину діагностування авіадвигунів з автоматичним виробленням експлуатаційних рішень-рекомендацій авіаперсоналу як у польоті, так і в наземних умовах реальної експлуатації, що цілком задовольняє міжнародні вимоги ISO – 9000-2000 та ICAO SARPS щодо забезпечення ефективності процесів експлуатації й безпеки польотів АТ.

Таким чином, розробка і впровадження в процеси експлуатації АТ нових методів поточного діагностування конструктивних вузлів та елементів проточної частини сучасних ГТД на основі використання інтелектуальних інформаційних технологій у вигляді експертних систем діагностування для забезпечення реалізації стратегії експлуатації ГТД за тех-

нічним станом є актуальною науково-технічною проблемою.

Концептуальна модель динамічної ЕСД „ЕКСПЕРТ – ГТД”

Як уже відзначалося вище, ЕСД є досить складним програмним продуктом, заснованим на взаємодії різномірних (гетерогенних) баз знань (БЗ) із гібридними математичними діагностичними моделями (МДМ) складних динамічних систем. Такі ЕСД одержали назву гібридних динамічних ЕС [5].

Сучасні ЕСД авіаційних ГТД (XMAN, TIL Shell3.0⁺) поєднують у собі комплексні підходи до представлення БЗ, в яких використовуються логічні методи, апарат семантичних мереж, фреймів, нечіткої логіки, нейронних мереж, генетичних алгоритмів. При цьому БЗ ЕСД включає кілька гетерогенних баз: експертних знань (БЕЗ), концептуальних знань (БКЗ), правил (БП) оперування знаннями і блоку когнітивної (пізнавальної) графіки (БКГ) представлення знань (рис. 2).

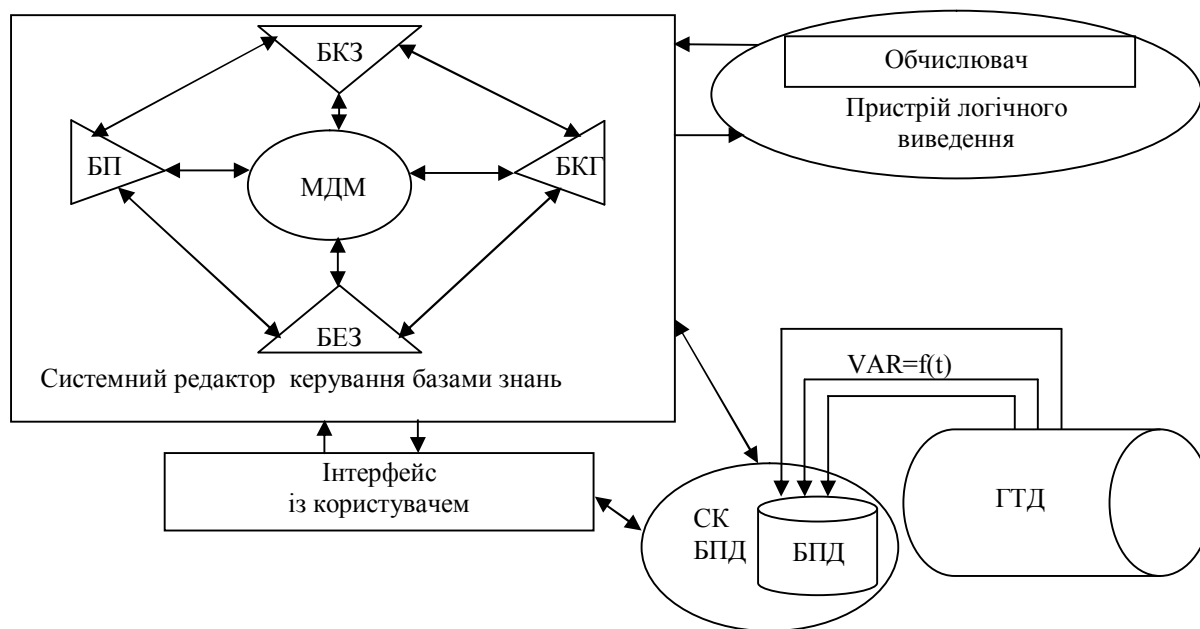


Рис. 2. Концептуальна модель процесу взаємодії гетерогенних БЗ в середовищі динамічної ЕСД „ЕКСПЕРТ – ГТД”

У БЕЗ розміщуються еталонні (стендові) дані про об'єкт діагностування, його можливих несправ-

ностях, методах їхнього розпізнавання і прогнозування технічного стану, технологіях усунення іден-

тифікованих несправностей і інша експертна інформація. БЕЗ представляється у виді чітких, нечітких і комбінованих даних (продукцій).

Наприклад, «якщо X , то Y », де X – умова виду $\text{DIV } X_1 \vee X_2 \vee \dots X_n$; X_i – змінна у вигляді $x_{i1} \& x_{i2} \& \dots x_{in}$; Y – відповідна дія у вигляді $y_1 \& y_2 \& \dots y_m$.

Нечіткість у БЕЗ можна представити для загального випадку наступним чином:

$$(X \rightarrow Y(Z)), \quad (1)$$

де $\{X\}$, $\{Y\}$, $\{Z\}$ – нечіткі множини, що частково або цілком визначають невизначені параметри діагностичної нечіткої моделі ГТД.

Таким чином, процес пошуку рішення задачі обчислювачем на математичній діагностичній моделі в середовищі ЕСД здійснюється за наступним запитом:

$$\text{МДМ}(K1) \rightarrow \text{МДМ}(K2)\{\Sigma\tau\}, \quad (2)$$

де МДМ – математична діагностична модель робочого процесу проточної частини типового ГТД;

$K1$, $K2$ – комплекс діагностичних параметрів та ознак конструктивних вузлів ГТД;

$\{\Sigma\tau\}$ – набір логічних операторів.

Діагностика ГТД (визначення причинно-наслідкових зв'язків) у середовищі БЕЗ ЕСД являє собою декомпозицію наступного виду:

$$\begin{aligned} \text{Задача}(X) \rightarrow (\text{Підзадача } 1(X1) \# \dots \\ \dots \# \text{Підзадача } N(Xn)), \end{aligned} \quad (3)$$

де X – набір вхідних і вихідних параметрів задачі, що вирішується;

$\#$ – символ переходу від одного блоку БЕЗ до іншого.

Крім того, кожна задача, що розв'язується, може бути декомпонована на ряд цільових підзадач. У цьому випадку вибір способу рішення основної задачі залежить від особливостей рішення кожної з підзадач, а параметр, що керує процесом рішення цільових підзадач (контроль параметрів і діагности-

ка вузлів ГТД), є властивістю її рішення. Отже, основна задача в БЕЗ перетвориться в послідовність цільових підзадач:

$$\begin{aligned} \text{Задача}(X) = \text{Властивість} \rightarrow \text{Підзадача } 1(X1) = \\ = \text{Властивість } 1 \# \dots \# \text{Підзадача } N(X_n) = \text{Властивість } n \end{aligned} \quad (4)$$

У БКЗ динамічної ЕСД ГТД розміщується математична діагностична модель контролю параметрів та припущення у виді формул, таблиць, графіків, нечітких правил, алгоритмів і т.п., що забезпечують структурну і фізичну організацію БЗ. При цьому форми представлення знань у ЕСД розділяються на описові (декларативні) і обчислювальні (процедурні), хоча цей поділ достатньо умовний, тому що МДМ, яка адаптована в програмну оболонку ЕСД, може ефективно використовувати обидві форми представлення знань (як логічну, так і мережеву). Так основою логічної МДМ у середовищі ЕСД є формальна система, яка у загальному виді може бути задана наступним чином:

$$M = \langle S, R, B, F \rangle, \quad (5)$$

де S – множина базових вузлів (елементів) моделі;

R – множина математичних і синтаксичних правил для S правильних виразів;

B – множина істинних виразів (аксіом);

F – семантичні (нечіткі) правила для побудови аксіом з інших виразів.

У мережевій моделі ЕСД на відміну від логічної можливо охопити більш складний спектр знань за рахунок включення в явній формі усіх відносин, що утворюють інформаційну структуру у виді семантичних (нейронних) мереж і фреймів [1, 2, 5, 7].

Слід зазначити, що процес адаптації МДМ такого складного динамічного об'єкта, як ГТД, у середовищі гібридної динамічної ЕСД є складною самостійною задачею, успішне рішення якої в більшості випадків досягається завдяки досвіду і знанням експерта, а також правильному обліку специфіки функціонування самої ЕСД.

База правил оперування знаннями в середовищі ЕСД реалізується у виді набору генетичних алгори-

тнів рішення, логічних і мережевих переходів, що забезпечують організаційну структуру БЗ (наприклад, "При <умова>, Тоді <дія>", або "Для <умова> Порівняти з <дія>").

Блок когнітивної графіки може оперувати наступними графічними поняттями [5]:

- **проект** (автономно функціонуюча супідрядна програма), що може за бажанням користувача працювати як автономно, так і в комплексі з іншими графічними поняттями;

- **графічний об'єкт** – квадрат (найпростіший елемент системного редактора), що дозволяє збирати з окремих понять більш складні;

- **Fuzzy** – коло (елемент нечітких знань БЕЗ), що дозволяє створювати нечіткі визначення;

- **зв'язок** – типове з'єднання елементів системного редактора в межах його поля;

- **Mein** – блок когнітивної графіки, відповідальний за автоматичний синтез С – програм за збіраною редактором схемою.

Функціонування БЗ забезпечується системою керування базами знань (СК БЗ) системного редактора у виді спеціальної програмної оболонки високого рівня [10].

Вхідною мовою ЕСД є інтерпретатор системи керування бази поточних даних (СК БПД), що дозволяє оперувати фреймами і семантичними мережами з їхнім подальшим розширенням елементами нечіткої логіки.

Функціональна модель експертної системи діагностування ГТД

У загальному випадку для побудови алгоритмів роботи ЕСД необхідна наявність формального опису ГТД як об'єкта експлуатації (реалізується в базі знань конкретного типу ГТД у виді математичних моделей його конструктивних вузлів і елементів функціональних систем) та поведінки двигуна і його вузлів у справному і несправному станах (реалізується в базі поточних даних за значеннями контро-

льованих параметрів ГТД від системи контролю і діагностики, а також по відповідним змінам розрахункових діагностичних ознак в інтерпретаторі виведення рішення ЕСД). У цьому випадку ЕСД можна представити як динамічну систему, сумісну з існуючою (штатною) системою контролю і діагностики типового ГТД.

Стан такої системи визначається значеннями наступних показників:

- $|X|$ – n -мірного вектора, компонентами якого є значення вхідних змінних $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, тобто поточні значення контрольованих параметрів з бази поточних даних системи контролю і діагностики двигуна та розрахункові значення діагностичних ознак вузлів й двигуна в цілому;

- $|Y|$ – m -мірного вектора, компонентами якого є відповідні вхідним задані номінальні $Y_{ном}$ чи граничні Y_m (Y_{max} , Y_{min}) значення контрольованих параметрів і діагностичних ознак ГТД $(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ з бази знань експертної системи;

- $|Z|$ – k -мірного вектора, компонентами якого є значення вихідних функцій $(Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ з інтерпретатора рішення ЕСД як результат порівняння й аналізу відповідних значень X_i й Y_i .

З огляду на вищезазначене, прикладна динамічна ЕСД типового ГТД повинна відповідати функціональній схемі, представленій на рис. 3, а також задовольняти наступним математичним моделям станів ГТД (і його конструктивних вузлів):

1. Математична модель справного стану:

$$Z = f(X = Y_{ном}; t). \quad (6)$$

2. Математична модель несправного стану:

$$Z' = f(X \geq Y_{max}; t) \text{ або } Z' = f(X \leq Y_{min}; t). \quad (7)$$

Граничними є наступні умови:

1. Множина несправних станів кінцева:

$$S_i \in S, \quad i = 1, 2, \dots, |S|. \quad (8)$$

2. Множина окремих несправностей кінцева:

$$O_i \in O, \quad i = 1, 2, \dots, |O|. \quad (9)$$

3. Забезпечується повна сумісність ЕСД із наземно-бортовою системою контролю і діагностики, тобто має місце відповідність бази знань, що міститься в ЕСД ($\text{БЗ}_{\text{ЕСД}}[Y_{\max}; Y_{\min}]$), бази поточних даних, сформованою системою контролю і діагностування типового ГТД ($\text{БД}_{\text{НБСКД}}[X_i(t)]$):

$$\begin{aligned} \text{БЗ}_{\text{ЕСД}}[Y_{\text{ном}}; Y_{\max}; Y_{\min}]] &\equiv \\ &\equiv \text{БД}_{\text{НБСКД}}[X_i(t)]. \end{aligned} \quad (10)$$

4. Усі діагностовані ГТД належать до класу об'єктів діагностування безперервної дії, тобто значення контрольованих параметрів і діагностичних ознак змінюються за часом безперервно:

$$X_i = f(t). \quad (11)$$

5. Рекомендації з льотно-технічної експлуатації і технічного обслуговування $R_{\text{експ}}(t)$ під час роботи експертної системи діагностування залежать від

значення функціонала $Z_i(t)$, який визначає технічний стан об'єкта діагностування:

$$R_{\text{експ}} = f\{Z_i(t)\}. \quad (12)$$

Функціонування прикладної динамічної ЕСД разом із НБСКД типового ГТД (рис. 3) забезпечується обчислювальним блоком, що інтерпретує рішення у вигляді значення функціонала $Z_i(t)$. Це значення кваліфікує технічний стан ГТД (чи його конструктивного вузла) як результат порівняння поточних контрольованих і розрахункових параметрів та діагностичних ознак $X_i(t)$ з їх базовими (заданими) значеннями ($Y_{i \text{ ном}}(\max, \min)$). На підставі значення функціонала $Z_i(t)$ ЕСД автоматично пропонує користувачу (авіафахівцю) рекомендації з ЛТЕ чи ТО ГТД $\{R_{\text{експ}}(t)\}$, що перетворюються авіаперсоналом у керуючі дії на процес ЛТЕ чи ТО $\{U_{\text{упр}}(t)\}$ і на ГТД, який діагностується $\{\mu_{\text{упр}}(t)\}$.

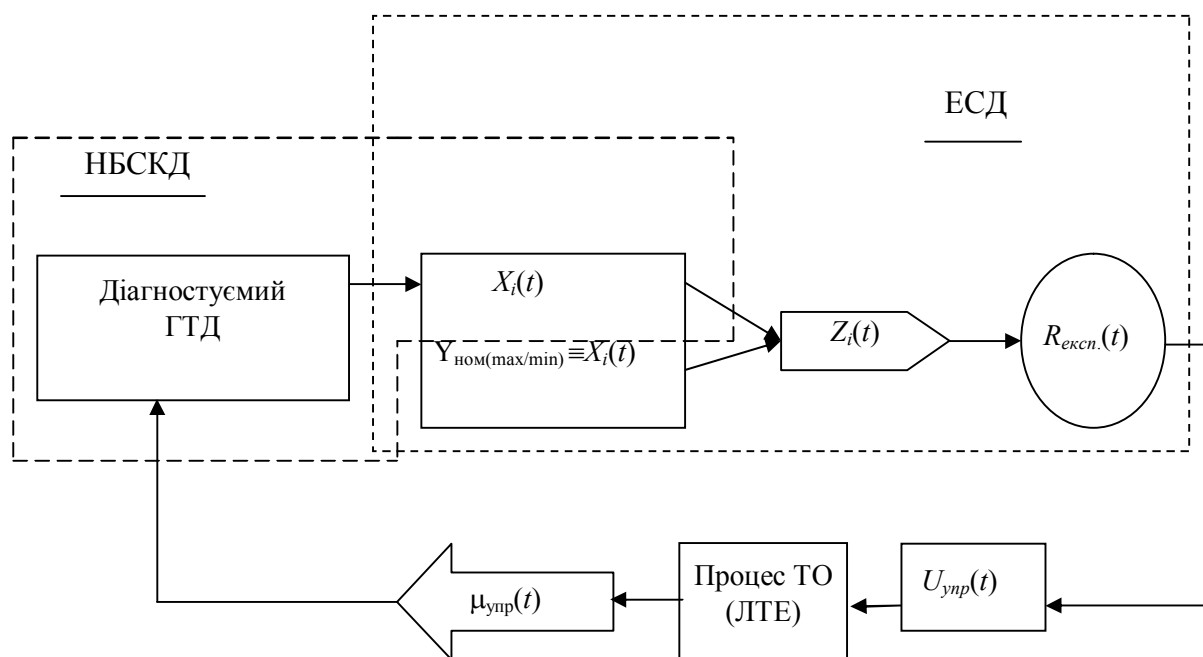


Рис. 3. Функціональна модель роботи ЕСД разом із НБСКД ГТД у процесі його експлуатації

Отже, використання прикладних експертних систем діагностування в реальних процесах експлуатації сучасних газотурбінних двигунів спрямоване на органічне доповнення і підвищення ефективності

існуючих штатних та систем контролю і діагностування, що проектуються, таких складних динамічних об'єктів експлуатації, якими є авіаційні силові установки.

Висновки

Сучасні міжнародні вимоги щодо підвищення ефективності процесів експлуатації авіаційної техніки, зниження впливу „людського фактору” на безпеку польотів висувають на перший план актуальність вирішення цих проблем шляхом використання нових інформаційних технологій у вигляді експертних систем поточного контролю та діагностування зразків авіатехніки.

Запропонована авторами модель прикладної інтелектуальної системи на прикладі експертної системи діагностування „ЕКСПЕРТ – ГТД” показує реальну можливість її розроблення й упровадження в процеси експлуатації конкретних газотурбінних двигунів. Отже, у поточний час для практичної реалізації ЕСД для конкретних типових авіаційних об’єктів експлуатації необхідна безпосередня зацікавленість керівників авіакомпаній та Державіаслужби України, які можуть виступати замовниками і координаторами застосування нових інформаційних технологій у практиці експлуатації сучасної авіаційної техніки.

Література

1. Игнатов В.А. Экспертные системы технического обслуживания. – К.: Знание, 1985. – 20 с.
2. Морозов А.О., В’юн В.І., Кузьменко Г.Є. Интеллектуализация информационных систем: ориентация на формирование знаний в процессах анализа „информационных згорток” // Математичні машини і системи. – 2005. – № 2. – С. 140-146.
3. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
4. Дмитрієв С.О., Чоха Ю.М. Актуальні проблеми експлуатації авіатехніки в цивільній авіації України // Стратегія розвитку України. – 2003. – № 1. – С. 56-64.
5. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
6. Jellison T.G., Pratt N.S., Dettoff R.L. “XMAN”: A tool for automated jet engine diagnostics // Intern. Conf. – Swansea: Cond. Monit., 1987. – P. 60-72.
7. Жернаков С.В. Комплексная диагностика и контроль параметров ГТД в условиях неопределенности активной экспертной системой // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Госуд. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2000. – Вып. 19. – С. 330-339.
8. ДСТУ ISO 9000 – 2001. Системи управління якістю. Основні положення та словник. – Держстандарт України, 2001.
9. ДСТУ ISO 9000 – 2001. Системи управління якістю. Вимоги. – Держстандарт України, 2001.
10. Искусственный интеллект. Справочник: В 3-х кн. Кн.1. Системы общения и экспертные системы. / Под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990. – 462 с.

Надійшла до редакції 3.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.С. Кулик, Національний авіаційний університет, Київ.