

УДК 681.3.069:681.3.015

+ 0551,410-082+3813

Ю.М. Чоха, канд. техн. наук

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА В ПРОЦЕСІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: zlp@nau.edu.ua

*Розглянуто сучасний стан проблеми експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів. Визначено недостатню ефективність застосованих методів і засобів їх діагностування та перспективність використання експертних (інтелектуальних) систем діагностування на підприємствах цивільної авіації.*

### Вступ

Однією з основних конструктивних частин повітряного судна (ПС), яка визначає безпеку його польоту, є силова установка (СУ), до складу якої, як правило, належить від двох до чотирьох газотурбінних двигунів (ГТД).

Висока вартість ГТД у порівнянні з іншими конструктивними частинами ПС і відповідальність функцій, які ними виконуються, ставлять жорсткі вимоги щодо збереження показників безвідмовності та льотної придатності в умовах експлуатації, забезпечення досить великих міжремонтних ресурсів.

Сучасні авіаційні ГТД є складними динамічними об'єктами авіаційної техніки (АТ).

Процеси, які в них відбуваються, характеризуються великою кількістю режимів роботи, багатопараметричністю, суттєвою нестаціонарністю, нелінійністю та взаємозв'язаністю.

Крім того, їх роботу забезпечує множина функціональних систем (паливна, масляна, автоматичного регулювання, охолодження, суфлювання та ін.), які також характеризуються різними особливостями. Все це робить процес експлуатації авіаційних СУ досить трудомістким і тривалим.

Завдання ускладнюється при проведенні оперативних та періодичних форм технічного обслуговування (ТО) конструктивних вузлів ГТД (компресора, турбіни, камери згоряння та ін.), технічний стан яких визначає справність та працездатність СУ.

Тривалість будь-якої форми ТО  $T_{TO}$  містить дві складові:

– постійну ( $t_{TO} = \text{const}$ ), яка визначається заданими регламентом ТО обсягами стандартних робіт, що обов'язково виконуються на кожному типі ГТД;

– змінну ( $t_{TO} = \text{var}$ ), яка визначається обсягами робіт з діагностування, ідентифікації (пошуку) та усунення знайдених несправностей конструктивних вузлів і елементів систем СУ, які виникли в польоті або діагностовано на землі.

Отже,

$$T_{TO} = f \begin{cases} t_{TO} = \text{const}; \\ t_{TO} = \text{var}. \end{cases}$$

Змінна складова тривалості ТО авіаційних СУ характеризується суттєвою непостійністю обсягів робіт, а отже, і їх трудомісткості та тривалості виконання.

Перехід від стратегії ТО за напрацюванням до стратегії ТО за технічним станом сучасних ГТД, яка базується на своєчасному діагностуванні передвідмовного несправного технічного стану (ТС) окремого конструктивного вузла, передбачає наявність розгалуженої системи контролю та прогнозування ТС СУ.

Під час проектування та виробництва авіаційних СУ використовують різні методи та засоби їх діагностики.

Загальна кількість контрольованих параметрів може досягати кількох десятків.

Результатом технічного діагнозу має бути надійний висновок про ТС СУ з визначенням (по можливості) виду, місця та причини виявлених несправностей, а також прогнозування можливості подальшої експлуатації СУ.

В авіапідприємствах авіаційний персонал ставить діагноз на основі визначеного всіма можливими методами діагностики (навіть інтуїтивними) технічного стану ГТД, виявлення без розбирання двигуна фактичних значень контрольованих параметрів (діагностичних ознак) та порівняння їх з допустимими відхиленнями від нормального (номінального) рівня, який відповідає заданим технічним умовам.

Це одне з найскладніших завдань в експлуатації ГТД, яке вирішується за допомогою автоматизованих систем діагностування (бортових типу МСРП, БСКД і наземних типу "Луч-84", "Аналіз-86" та ін.) [1; 2].

Але найбільший розвиток останніми роками одержали 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 та ін.).

Вони передбачають використання бортових автоматизованих підсистем, які працюють у тісному зв'язку з наземними системами діагностування.

Проте ефективне вирішення проблеми визначення діагнозу ТС ГТД ускладнюється тим, що як бортові, так і наземні електронні реєстраційні й накопичувальні пристрої являють собою розподілену слабкозв'язану між собою обчислювальну систему, яка потребує додаткового розшифровування та аналізу авіаційними фахівцями великого обсягу даних про роботу СУ ПС, що значно знижує ефективність їх експлуатації.

Отже, застосовані на сучасному етапі методи і засоби контролю та діагностики ГТД потребують суттєвих доопрацювань (особливо для перехідних і нестационарних режимів роботи), тому що для нових поколінь авіаційних СУ необхідні якісно нові інформаційні комп'ютерні технології, які базуються на теорії експертних систем, нечіткої логіки і генетичних алгоритмів [3].

До них належать інтелектуальні інформаційні технології контролю об'єктів експлуатації, які ґрунтуються на експертних базах знань (БЗ) і називаються експертними системами діагностування (ЕСД).

#### Інтелектуалізація експлуатації газотурбінних двигунів

Оптимальної ефективності використання засобів діагностування ГТД можна досягнути лише за умови їх об'єднання в єдину інтегральну систему діагностування, яка зможе оперативно і надійно вирішувати задачі своєчасного виявлення несправностей ГТД і оцінювати тенденції зміни його ТС.

Причому саме завдяки об'єднанню в єдину систему засобів діагностування досягається найбільший ефект їх застосування порівняно з роздільним їх використанням, яке рекомендується в інструкціях з експлуатації конкретних типів ГТД.

Саме таку інтегруючу (об'єднуювальну) роль має виконувати інтелектуальна ЕСД у поєднанні з НБДС сучасних ГТД.

При цьому широке застосування ЕСД технічного стану в процесі експлуатації АТ (ГТД, функціональних систем, ПС у цілому) дозволить суттєво (на 30...70% [2]) знизити вплив змінної складової на тривалість та трудомісткість ТО об'єктів АТ, підвищити ефективність їх експлуатації, наблизитися до виконання стратегічної задачі цивільної авіації: на 12 год напрацювання на добу – не більше 12 год ТО впродовж життєвого циклу ПС.

Таке співвідношення відповідає значенню коефіцієнта питомих витрат часу на виконання ТО ПС  $K_t = 1,0$ :

$$K_t = T_{ТО} / T_n,$$

де  $T_{ТО}$  – сумарна тривалість простою ПС на виконанні оперативних  $T_{ТО}$ , періодичних  $T_{ПТО}$  і ремонтних  $T_{КВР}$  форм ТО:

$$T_{ТО} = T_{ТО} + T_{ПТО} + T_{КВР},$$

$T_n$  – сумарний час напрацювання ПС на визначений календарний період (місяць, квартал, рік тощо).

Експертні системи діагностування сучасного ГТД за своєю фізичною суттю належать до складного програмного комплексу [3], який об'єднує можливості міні-ЕОМ із знаннями й досвідом експертів-фахівців у питаннях конструкції та експлуатації ГТД.

Вони в ЕСД мають вигляд БЗ у такій формі, яка дозволяє ЕОМ, використовуючи поточну діагностичну інформацію від бортових та наземних засобів контролю і діагностики ГТД, оперативно її обробляти, аналізувати та надавати "розумне" вирішення поставленої задачі (діагнозу та/або прогнозу ТС ГТД).

Це вирішення видається користувачу (авіаційному персоналу) у вигляді готового експертного висновку щодо справності конструктивних вузлів об'єкта діагностування про найбільш вірогідні причини виявлених несправностей і технології їх усунення, а також прогнозування подальшого процесу деградації об'єкта під час його експлуатації.

Функціонування ЕСД забезпечується за умови наявності бази даних (БД) від НБДС ГТД, яка формується від вимірювальних діагностичних блоків у всьому спектрі контрольованих параметрів СУ.

Для підвищення ефективності ТО двигунів ТР-34 на літаках А-310 створено ЕСД "ХМАН" [2], а також методику контролю і діагностики ГТД на базі нечіткої активної ЕСД TIL Shell 3.0<sup>+</sup>[4].

У загальному випадку для побудови алгоритмів роботи ЕСД необхідна наявність опису ГТД як об'єкта експлуатації (реалізується в БЗ конкретного типу ГТД у вигляді математичних моделей його конструктивних вузлів і функціональних систем) та його поведінки в справному й несправному технічних станах (реалізується в БД поточних значень контрольованих параметрів ГТД від його системи діагностики).

В інтерпретаторі виведення рішення ЕСД (обчислювальній системі) аналізуються зміни діагностичних ознак, за якими надається експертний висновок про ТС об'єкта діагностування.

У такому разі ЕСД можна уявити як динамічну (активну) систему, сумісну із системою діагностики ГТД.

Стан такої системи визначається такими показниками:

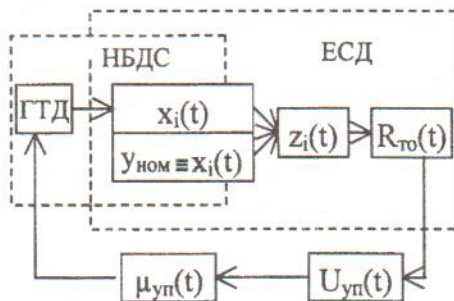
– складовою  $|x|$  вектора  $n$ , компонентами якого є значення векторних змінних  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , тобто поточні значення контрольованих параметрів від БД системи діагностики;

– складовою  $|y|$  вектора  $m$ , компонентами якого є відповідні вхідним задані номінальні  $y_{\text{ном}}$  або межові  $y_{\text{max}}$  значення контрольованих параметрів ГТД, тобто  $y_1, y_2, \dots, y_m$ , від БЗ експертної системи;

– складовою  $|z|$  вектора  $k$ , компонентами якого є значення вихідних функцій (діагностичних ознак)  $z_1, z_2, \dots, z_k$ , що визначаються інтерпретатором виведення рішення ЕСД після порівняння і аналізу відповідних значень  $x_i$  з  $y_i$ .

На основі одержаного значення функціонала  $z_i(t)$  ЕСД автоматично надає користувачу рекомендації щодо ТО ГТД  $R_{\text{ТО}}$ , які використовуються авіаційним персоналом для обрання керуючої дії на процес ТО  $U_{\text{уп}}(t)$  та на ГТД, який діагностується  $\mu_{\text{уп}}(t)$ .

Отже, прикладна активна ЕСД ГТД має функціонувати за визначеною схемою (див. рисунок)



Функціональна схема роботи ЕСД у поєднанні з НБДС ГТД в процесі його експлуатації

і відповідати таким математичним моделям технічного стану ГТД (або його конструктивних вузлів):

– математичної моделі справного стану:

$$Z = f(x = y_{\text{ном}}; t);$$

– математичної моделі несправного стану:

$$z' = f(x = y_{\text{max}}; t);$$

– скінченної множини несправних станів:

$$S_i \in S, i=1, 2, \dots, |S|;$$

– скінченної множини окремих несправностей:

$$O_i \in O, i=1, 2, \dots, |O|.$$

Межевими умовами моделей є:

– повна сумісність ЕСД з НБДС, тобто відповідність бази знань в ЕСД

$$B_{\text{з.ЕСД}} \left( \left[ \sum_{i=1}^m y_{\text{ном}}, \sum_{i=1}^m y_{\text{max}} \right] \right) \text{БД, яка формується}$$

системою діагностування конкретного ГТД

$$B_{\text{д.НБДС}} \left( \left[ \sum_{i=1}^n x_i(t) \right] \right);$$

$$B_{\text{з.ЕСД}} \left[ \sum_{i=1}^m y_{\text{ном}}, \sum_{i=1}^m y_{\text{max}} \right] \equiv B_{\text{д.НБДС}} \left[ \sum_{i=1}^n x_i(t) \right];$$

– належність усіх ГТД, які діагностуються, до класу об'єктів діагностування безперервної дії, тобто зміна контрольованих параметрів у часі безперервно:  $x_i = f(t)$ ;

– рекомендації щодо ТО ГТД залежать від значення функціонала  $z_i(t)$ , який визначає технічний стан об'єкта діагностування:  $R_{\text{ТО}} = f[z_i(t)]$ .

Процес експлуатації ГТД складають процеси його льотно-технічної експлуатації (ЛТЕ), які визначають вибір і реалізацію режимів роботи ГТД, підтримання його працездатності в польоті, а також процеси ТО, які забезпечують підтримання і відновлення справності й льотної придатності ГТД у наземних умовах. У зв'язку з цим ефективність використання ЕСД у поєднанні з НБДС сучасної СУ в процесі експлуатації має декілька специфічних особливостей.

1. Керування процесом ЛТЕ СУПС зводиться до вибору оптимального (найвигіднішого) режиму її роботи, обмеженню деяких режимів або вимикання двигуна у випадках перевищення контрольованих параметрів (температури газів або мастила, тиску палива або мастила, частоти обертання турбокомпресора, рівня вібрації, виникнення помпажу компресора та ін.).

Розширення можливостей керування процесом ЛТЕ ГТД досягається шляхом використання спеціалізованих бортових діагностичних пристроїв (автоматизованих систем контролю типу БСКД) у сукупності з бортовою ЕОМ.

Упровадження до складу бортових систем діагностування ГТД інтелектуальних ЕСД дозволяє підвищити ефективність оперативної обробки діагностичної інформації в умовах польоту та підтримувати логічними рекомендаціями (на основі БЗ ЕСД та інтерпретації її рішення) прийняття екіпажем необхідних керуючих дій в умовах обмеженого проміжку часу.

2. Основні операції з діагностування СУПС, розшифрування й аналіз даних польоту здійснюються в наземних умовах у процесі її ТО. При цьому великий обсяг інформації надходить від

наземних методів діагностування (наприклад, дані спектрального аналізу палива та мастил, структури вібросигналів, візуально-оптичного контролю та ін.). У цих умовах авіаційному персоналу досить складно правильно узагальнити й оперативно проаналізувати весь обсяг діагностичної інформації. Це призводить або до неправильних рішень, або до затягування процесу ТО ГТД.

Саме ЕСД за виявленими нею закономірностями може здійснити не лише інтегральну оцінку ТС двигуна, але й диференціювати її за окремими конструктивними вузлами, що особливо актуально для сучасних ГТД модульних конструкцій.

3. Концептуальною особливістю використання прикладних ЕСД ГТД вважається удосконалення технологій збору, обробки й аналізу великих масивів діагностичної інформації, яка формується в процесі експлуатації АТ. Крім того, упровадження ЕСД підвищує можливості авіаційного персоналу під час оперативного аналізу діагностичної інформації, виявлення загальних тенденцій у зміні технічного стану ГТД, пошуку несправностей, зниження трудомісткості ТО авіаційних двигунів.

Ю.Н. Чоха

Особенности использования экспертной системы диагностирования газотурбинного двигателя в процессе его эксплуатации

Рассмотрено современное состояние проблемы эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей. Определены недостаточная эффективность используемых методов и способов их диагностирования, перспективность применения экспертных (интеллектуальных) систем диагностирования на предприятиях гражданской авиации.

Y.M. Chokha

Some features of the expert diagnostic system application for trouble shooting a gas-turbine engine in the process of its operation

The present state of the problem of the aircraft gas-turbine engines operation is considered. Shortcomings of the methods and techniques applied for their diagnosis are determined and an inference about the perfectiveness of the expert diagnostic systems application is made. A block diagram of the expert diagnostic system operation as well as a scheme of the expert diagnostic system application at an airline enterprise is developed and grounded.

## Висновки

Розробка та впровадження прикладних ЕСД сучасних ГТД направлено на органічне доповнення систем їх діагностування та підвищення ефективності експлуатації таких складних динамічних об'єктів АТ, якими є авіаційні СУ.

## Список літератури

1. Кулик Н.С. Параметрические методы оценки технического состояния авиационных ГТД в эксплуатации. – К.: КИИГА, 1993. – 139 с.
2. Дмитриев С.А. Диагностирование проточной части ГТД на переходных режимах работы. – К.: КМУГА, 1996. – 120 с.
3. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
4. Жернаков С.В. Комплексная диагностика и контроль параметров ГТД в условиях неопределенности активной экспертной системой //Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. – Харьков: Гос. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2000. – Вып. 19. – С. 330–339.

Стаття надійшла до редакції 15.04.03.