

УДК 629.734.7

АСЛАНЯН А.Е., провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, професор

БЕЛЬСЬКА О.А., доцент, кандидат технічних наук, Національний авіаційний університет

ЗАГАЛЬНА ЗАДАЧА СИНТЕЗУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ СИЛОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Запропоновані загальні принципи, на базі яких може бути побудована інтегральна інформаційно-обчислювальна система обробки параметрів, що характеризують технічний стан динамічного об'єкту. Ця система дозволяє замкнути контур керування технічним станом об'єкта експлуатації від'ємним зворотним зв'язком та перейти від стратегії його технічної обслуговування за наробітком до стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів.

Ключові слова: інтегральна інформаційно-обчислювальна система обробки параметрів, технічний стан динамічного об'єкту, стратегія технічного обслуговування за станом.

Газотурбінні двигуни (ГТД), починаючи з середини минулого століття, знайшли широке застосування в авіації (турбореактивні одноконтурні та двоконтурні, турбовентиляторні; турбогвинтові, турбовальні та підйомні для літаків вертикального зльоту і посадки), в енергетиці (газотурбінні нагнітачі газоперекачувальних станцій, пересувні електростанції з газотурбінним приводом машинних генераторів електричного струму), в залізничному транспорті (газотурбовози і високошвидкісні турбопоїзди), в морському транспорті (високошвидкісні бойові водовиміщувальні кораблі, цивільні судна морського флоту, судна з динамічним підтриманням), в автомобілебудуванні (великовантажні автомобілі, транспортери військового призначення, бойові гусеничні машини) та інше. При технічній експлуатації вищенаведених динамічних об'єктів традиційно застосовується метод технічної експлуатації за ресурсом зі стратегією технічного обслуговування за наробітком. У більшості випадків ГТД є високотехнологічними, а тому і висококошторисними об'єктами, експлуатація яких з використанням стратегії технічного обслуговування за наробітком є економічно недоцільною внаслідок суттєвого недовикористання їх фактичного ресурсу. З іншого боку, використання такої стратегії технічного обслуговування при експлуатації конверсійних авіаційних двигунів, в якості силових установок також є недоцільним внаслідок необхідності постійного подовження їх призначеного ресурсу.

Ефективність обраної стратегії технічного обслуговування визначається повнотою інформації про поточний технічний стан об'єкта в процесі експлуатації. Реальний поточний стан динамічного об'єкта, визначений методами і засобами технічної діагностики, має обумовлювати перелік і обсяги профілактичних та відновлювальних робіт кожного конкретного об'єкта технічного обслуговування. Існуючі стратегії і програми технічного обслуговування за технічним станом динамічних об'єктів можна умовно розділити на три групи: з контролем рівня надійності об'єкта експлуатації; з контролем параметрів об'єкта експлуатації; гібридні. Силові газотурбінні установки, що наразі знаходяться в експлуатації, як правило, є об'єктами експлуатації з високою функціональною значимістю, що мають недостатній ступінь резервування, а також невисокий рівень експлуатаційної технологічності та контролепридатності. Тому для них доцільне застосування стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів, при якій передбачається неперервний або періодичний контроль параметрів, що визначають фактичний поточний технічний стан кожного окремого об'єкта експлуатації.

Вибір вимірюваних параметрів, які підлягають такому контролю, як правило, неоднозначний, що обумовлено як специфічними особливостями динамічного об'єкта, так і різноманітним характером зв'язків несправностей з функціональними параметрами. Разом з тим, незважаючи на зазначену неоднозначність, вимоги, що повинні визначати вибір вимірюваних функціональних параметрів, носять загальний характер, згідно з яким вимірювані параметри повинні мати: прийнятні точність і стабільність показань у часі; найбільшу серед інших параметрів діагностичну цінність, а також ґрунтуватися на штатних вимірюваннях та забезпечувати простоту і зручність експлуатації вимірювальних засобів, що використовуються [1]. Для силових газотурбінних установок різного призначення за рівнем діагностичної цінності вимірювані функціональні параметри умовно можуть бути розділені на дві групи. До першої групи з більшою питомою вагою відносяться: температура перед турбіною і за турбіною, тиск за компресором, частоти обертання (висока точність і стабільність вимірювань у часі), температура та тиск масла в системі змащування, параметри вібрації вала. До другої групи вимірюваних параметрів з меншою питомою вагою можна віднести всі інші параметри: температура на виході камери згоряння, тиск на виході турбіни, температура в порожнині колеса турбіни, температура на виході компресора, витрата палива та інші. Але, як свідчить досвід експлуатації газотурбінних установок (ГТУ), сумарний вплив несправностей, що в них виникають, на вихідні функціональні параметри суттєво нижче рівня відхилень, які викликані зміною режиму роботи ГТУ та зовнішніх умов експлуатації. Тому для зменшення впливу зміни режимів та випадкових змін зовнішніх умов функціонування ГТУ, зазвичай використовуються комплексні діагностичні параметри, які, як правило, є приведеними до безрозмірної форми відхиленнями вихідних функціональних параметрів від їх номінальних величин, що відповідають справному стану ГТУ.

Слід зазначити, що будь-який динамічний об'єкт технічного обслуговування, в першу чергу є об'єктом автоматичного регулювання, що використовується за своїм функціональним призначенням і характеризується сукупністю вхідних

(регулюючих) параметрів, що утворюють вектор $\mathbf{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))^T$ і сукупністю вихідних (регульованих) параметрів, що утворюють вектор $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_r(t))^T$, а також сукупністю спостережуваних (вимірюваних) параметрів, що утворюють вектор $\mathbf{y}(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))^T$, $m \leq r < n$. При цьому основна задача системи автоматичного регулювання – забезпечення номінальних (штатних) режимів функціонування об'єкта технічного обслуговування. При побудові систем автоматичного регулювання за принципом від'ємного зворотного зв'язку традиційно використовуються лінійні динамічні моделі об'єктів регулювання, що пояснюється малістю відхилень значень вихідних функціональних параметрів від їх номінальних значень, тобто використовується сукупність лінійних диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які пов'язують між собою приведені до безрозмірної форми відхилення функціональних параметрів від їх номінальних значень. Таким чином, в якості параметрів, що характеризують поточний технічний стан об'єкта технічного обслуговування, доцільно розглядати параметри його лінійної динамічної моделі (коефіцієнти підсилення, сталі часу). Ці параметри характеризують технічний стан справного об'єкта і, водночас, є нечутливими до випадкових змін зовнішніх умов та режимів функціонування. При побудові лінійної динамічної моделі об'єкта варто керуватися наступним правилом: лінійна динамічна модель об'єкта повинна зв'язувати функціональні параметри об'єкта технічного обслуговування, які мають найбільшу діагностичну цінність. У цьому випадку параметри лінійної динамічної моделі цілком характеризують поточний технічний стан динамічного об'єкта і їх зміна у часі характеризує процес "старіння" об'єкта технічного обслуговування.

В загальному випадку [2] рівняння стаціонарної лінійної динамічної моделі для силової ГТУ можуть бути записані у вигляді

$$\begin{cases} \mathbf{T} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{x}(t) = \mathbf{K}\mathbf{u}(t), & (1) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{K}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}_2\mathbf{u}(t), & (2) \end{cases}$$

де \mathbf{T} - невироджена матриця узагальнених сталих часу, розміру $r \times r$, а матриці \mathbf{K} , \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 - матриці коефіцієнтів підсилення, розмірів $r \times m$, $n \times r$, $n \times m$ відповідно.

Рівняння (1) - це рівняння руху, а рівняння (2) - це рівняння спостереження. Загальна кількість параметрів у цих матрицях $N = (n + r)(m + r)$ суттєво перевищує кількість спостережуваних параметрів n . Серед параметрів лінійної динамічної моделі виділяються статистично незалежні (або слабо залежні) параметри, тобто множина параметрів лінійної динамічної моделі факторизується і у кожний клас потрапляють параметри з високим ступенем взаємної кореляції.

Цілком зрозуміло, що для замикання контуру керування технічним станом динамічного об'єкта від'ємним зворотним зв'язком, в першу чергу, необхідно мати можливість неперервного контролю параметрів, що характеризують його технічний стан. У тих випадках, коли поточний технічний стан динамічного об'єкта оцінюється по значенням відхилень функціональних параметрів від їх номіналів,

неперервний контроль здійснюється за допомогою штатних контрольних-вимірювальних систем. Якщо ж оцінка поточного технічного стану динамічного об'єкта виконується за допомогою параметрів його лінійної динамічної моделі, то для здійснення неперервного контролю цих параметрів, необхідно синтезувати адаптивну систему неперервного контролю. Ця система може бути побудована з використанням метода ортогонального проектування [3], або ж метода кворумування [4]. Для лінійної динамічної системи (1-2) матриця передаточних функцій системи ортогонального проектування має вигляд

$$\mathbf{H}(p) = \left(\mathbf{K}_1 (\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{K}_2 \right) \left[\mathbf{K}^T (\mathbf{T}^T p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K}_1^T \mathbf{K}_1 (\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{K}_2^T \mathbf{K}_1 (\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{K}_2^T \mathbf{K}_2 \right]^{-1} \left(\mathbf{K}^T (\mathbf{T}^T p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K}_1^T + \mathbf{K}_2^T \right). \quad (3)$$

В комплексній площині зв'язок між зображенням за Лапласом вектора спостережуваних параметрів $\mathbf{Y}(p)$ та його проекцією $\mathbf{Y}_{pr}(p)$ має вигляд

$$\mathbf{Y}_{pr}(p) = \mathbf{H}(p) \mathbf{Y}(p),$$

тому, якщо параметри лінійної динамічної моделі не відповідають поточному технічному стану динамічного об'єкта буде виконуватись нерівність

$$\mathbf{Y}(p) \neq \mathbf{Y}_{pr}(p),$$

а відповідно і

$$\mathbf{y}(t) \neq \mathbf{y}_{pr}(t), \quad (4)$$

для усіх $t > t_1$.

В момент часу t_1 , коли вперше спостерігається нерівність (4), необхідно виконати адаптацію параметрів лінійної динамічної моделі до нового поточного технічного стану ГТУ. Нові значення параметрів лінійної динамічної моделі, а, відповідно, і параметри матриці передаточних функцій оператора ортогонального проектування (3) можуть бути знайдені одним з методів параметричної ідентифікації [5], при виборі якого основним принципом є мінімальність втручання в штатний режим функціонування ГТУ. Після знаходження нових значень параметрів лінійної динамічної моделі відновиться виконання рівності $\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_{pr}(t)$, і ця рівність буде мати місце до моменту часу $t_2 > t_1$, у який буде виконуватись вдруге нерівність (4). В момент часу t_2 вдруге необхідно виконувати процедуру параметричної ідентифікації. Параметри лінійної динамічної моделі, які визначаються під час ідентифікації в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n , є вихідними даними для статистичної обробки з метою виявлення некорельованих (слабо корельованих) параметрів, що необхідно для формування вектора визначальних параметрів, а також для побудови адаптивної моделі прогнозування кожного параметра індивідуально.

Неперервний контроль параметрів лінійної динамічної моделі, як вже зазначалось, забезпечує зворотний зв'язок у контурі керування технічним станом динамічного об'єкта та дозволяє одержувати обсяг інформації про технічний стан об'єкта, що виключає можливість раптових відмов. Для поступових відмов необхідно розробляти спеціальні методи прогнозування цих параметрів, основною

задачею яких має бути своєчасне виявлення передвідмовного стану об'єкта. Слід зазначити, що процес зміни відповідних параметрів, які характеризують технічний стан об'єкта, як правило, має монотонний характер. Виходячи із цього, з кожного класу параметрів з високим ступенем кореляції необхідно вибрати по одному представнику, який швидше за всіх наближається до границі області, що характеризує передвідмовний стан ГТУ. Обрані параметри утворюють вектор визначальних параметрів $\mathbf{n}(t) = (v_1, \dots, v_k)^T$, $k < N$.

Справний стан об'єкта технічного обслуговування в момент часу t еквівалентний виконанню співвідношення

$$\mathbf{n}(t) \in D,$$

де D – поле допуску для вектора визначальних параметрів. Зважаючи на те, що при кожному фіксованому t , про істинне значення вектора $\mathbf{n}(t)$ можна судити тільки по вектору $\mathbb{N}(t)$ – вектору точкових оцінок координат вектора $\mathbf{n}(t)$, то висновок про технічний стан динамічного об'єкта можна зробити тільки з визначеною довірчою імовірністю $P_{\text{дов}}$. Тому, якщо імовірність

$$P\{\mathbb{N}(t) \in D_\varepsilon\} \cong 1,$$

де $D_\varepsilon \subset D$, то з довірчою імовірністю $P_{\text{дов}}$ можна стверджувати, що в поточний момент часу t технічний стан динамічного об'єкта відповідає справному.

Для того, щоб можна було зробити висновок про імовірний технічний стан ГТУ в майбутньому необхідно, як вже відзначалось, виконувати прогнозування вектора визначальних параметрів, при цьому слід використовувати адаптивні моделі прогнозування для кожної координати вектора визначальних параметрів, що здатні реагувати на зміни технічного стану динамічного об'єкта. При використанні адаптивних методів прогнозування, наприклад, адаптивного методу експоненціального згладжування, динамічний ряд згладжується за допомогою зваженої ковзної середньої, вага якої, враховуючи монотонний характер зміни параметра, визначається останніми значеннями динамічного ряду. Це дає можливість отримати оцінку параметрів тренду, яка характеризує не середній рівень досліджуваного ряду, а тенденцію, що склалася на момент останнього спостереження.

Принципи побудови адаптивної системи неперервного контролю параметрів, що характеризують технічний стан, і адаптивних моделей прогнозування цих параметрів є універсальними для широкого класу динамічних об'єктів, а лінійна динамічна модель об'єкта технічного обслуговування створюється для кожного такого об'єкта індивідуально. Слід зауважити, що для більшості динамічних об'єктів, які знаходяться в експлуатації, не передбачалося використання стратегії технічного обслуговування за станом, а, отже, в них відсутні системи вбудованого контролю визначальних параметрів, і самі визначальні параметри не визначені розробником виробу, тому задача організації технічного обслуговування за наробітком з прогнозуванням передвідмовного стану, а також технічного обслуговування за станом з контролем параметрів, повинна вирішуватися на базі штатних контрольно-вимірювальних систем.

На основі інформації про поточний технічний стан силової ГТУ та з урахуванням результатів прогнозування робиться висновок про можливість її подальшої технічної експлуатації, або ж про необхідність проведення ремонтних робіт певного обсягу. Таким чином, контур керування технічним станом силової ГТУ стає замкнутим.

Підсумовуючи вищенаведені міркування можна зробити висновок, що інтегральна інформаційно-обчислювальна система повинна вирішувати дві основні задачі: достовірну оцінку поточного технічного стану динамічного об'єкта і прогнозування передвідмовного стану у середньостроковій та довгостроковій перспективі. Виходячи з цього в загальному випадку структура автоматизованої системи керування технічним станом силової ГТУ має вигляд, наведений на рис. 1.

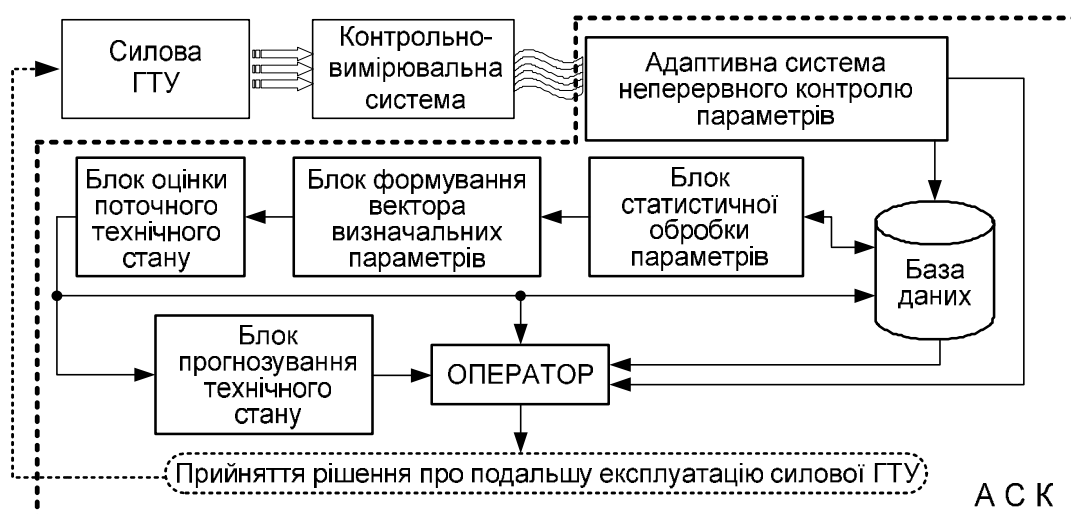


Рис.1. Структурно-функціональна схема АСК технічним станом силової ГТУ

ВИСНОВКИ

1. Головною умовою при організації технічного обслуговування динамічних об'єктів за станом з контролем параметрів є наявність можливості безперервного контролю параметрів, що характеризують його поточний технічний стан. Вибір таких параметрів є неоднозначним, що обумовлено як специфічними особливостями динамічного об'єкта, так і різноманітним характером зв'язків несправностей з параметрами, що контролюються. Разом з тим, незважаючи на зазначену неоднозначність, вимоги до визначальних параметрів носять загальний характер: визначальні параметри повинні мати прийнятні точність і стабільність показань у часі, мати найбільшу серед інших параметрів діагностичну цінність, не залежати від змін зовнішніх умов експлуатації та режимів функціонування, ґрунтуватися на штатних вимірюваннях.

2. Система безперервного контролю параметрів, що характеризують технічний стан динамічного об'єкта, повинна бути адаптивною, тобто змінюватись відповідно до зміни технічного стану ГТУ. Використання в якості характеристики поточного технічного стану об'єкта сукупності параметрів його лінійної динамічної моделі обґрунтовано для широкого класу об'єктів, система керування яких працює в режимі стабілізації, а тому синтезована на базі цієї моделі адаптивна система неперервного

моніторингу забезпечує можливість оцінки поточного технічного стану силової ГТУ та дає можливість прогнозування її технічного стану. При цьому адаптація параметрів лінійної динамічної моделі об'єкта до нового технічного стану ГТУ повинна здійснюватись за умови якнайменшого втручання в штатний режим роботи ГТУ.

3. Використання адаптивних моделей прогнозування визначальних параметрів, що здатні реагувати на зміни технічного стану об'єкта технічного обслуговування, дає можливість попередження поступових відмов та своєчасного виявлення передвідмовного стану ГТУ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. – М.: «Недра», 1987.– 199 с.
2. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. М. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
3. Асланян А.Э., Бельская А.А. Математические проблемы технической эксплуатации по состоянию // Науковий вісник АМУ: Серія «Техніка». Вип.2. – К., 2009.–С. 94-99.
4. A. Aslanyan, A. Belskaya. Diagnosing of controlled dynamic system using the Quorum-method // Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technology. The IV world congress: abstracts. -К., 2010.-P.16.60-16.63.
5. Справочник по теории автоматического управления/ Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712с.

Надійшла до редакції 31.10.2011