ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

УДК 621.452.3.017-047.44 **doi: 10.32620/aktt.2025.4sup2.19**

А. В. ДУНАЙ

АТ «Елемент», Одеса, Україна
Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ТА ПОЕТАПНА РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ТВ3-117В

У статті розглянуто підхід до формалізованої побудови діагностичної моделі газотурбінного двигуна ТВ3-117В, орієнтованої на післяпольотний аналіз експлуатаційних даних. Ця модель призначена для виявлення потенційно небезпечних відхилень у роботі двигуна на основі порівняння фактичних параметрів з еталонними значеннями з урахуванням режиму функціонування. Обґрунтовано актуальність створення інструменту післяпольотної діагностики з урахуванням специфіки двигуна ТВ3-117В і обмежень існуючих підходів, що базуються переважно на емпіричних або статистичних методиках без структурованого урахування режимної залежності. У роботі визначено перелік діагностично значущих параметрів (температура газу за турбіною, частота обертання компресора, крутний момент, витрата палива, логічні сигнали), які поділено на режимоідентифікуючі, діагностичні та допоміжні. Запропоновано модульну структуру діагностичної моделі, яка включає блоки попередньої обробки, режимної ідентифікації, нормалізації параметрів, еталонних характеристик, порівняння з еталонами та формування логічних висновків. Описано алгоритм режимної ідентифікації на основі поєднання логічних ознак і граничних значень основних параметрів для фіксації належності до одного з п'яти режимів: малого газу, крейсерського, злітного, 2,5-хвилинної потужності, консервації/розконсервації. Окрему увагу приділено формулюванню критеріїв ідентифікації потенційно небезпечних відхилень. Показано, що урахування не лише абсолютних відхилень, а й міжпараметричних співвідношень динаміки зміни параметрів дозволяє підвищити достовірність діагностуванняи. На прикладі режиму «Малий газ» продемонстровано реалізацію набору критеріїв із фіксацією порушень стабільності температури, крутного моменту та частоти обертання ротора. Обґрунтовано, що для кожного режиму доцільно формувати окремий шаблон еталонної поведінки, який використовується для порівняння під час аналізу. Запропонована структура діагностичної моделі є основою для подальшої реалізації автоматизованої експертної системи аналізу післяпольотних даних.

***Ключові слова**: діагностична модель; газотурбінний двигун. ТВ3-117В; режимна ідентифікація; критерій відхилень; післяпольотний аналіз.*

Вступ

У сучасній експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) дедалі більшого значення набуває післяпольотна аналітика – аналіз параметрів роботи двигуна за результатами виконаних польотів для виявлення тенденцій деградації, граничних режимів і потенційних технічних відмов. На відміну від бортових систем моніторингу, післяпольотний аналіз дозволяє глибше опрацьовувати дані, застосовувати складніші алгоритми обробки та виявляти причинно-наслідкові зв'язки, які неможливо діагностувати в реальному часі.

Особливої уваги потребує побудова діагностичних моделей для двигунів типу ТВ3-117В, що широко застосовуються в авіаційній техніці. У зв'язку з багаторежимним характером їхньої роботи, чутливістю до зовнішніх умов і специфікою системи регулювання, використання універсальних діагностичних підходів є недостатньо ефективним. Більшість наявних моделей орієнтовано на уніфіковані алгоритми та спрощені умови [1,2], у той час як специфіка ТВ3-117В вимагає індивідуалізованого підходу через складну багаторежимну, динаміку і специфічну систему регулювання.

Сучасні підходи до діагностики ГТД все частіше поєднують аналітичні моделі з емпіричними або статистичними методами. Наприклад, у роботі [3] представлено аналітичну модель розрахунку робочих режимів двигуна ТВ3-117, побудовану на основі експериментальних даних. Це дозволяє створювати еталонні залежності параметрів, з якими можна порівнювати результати реального польоту.

У роботі [4] розглянуто структуру інформаційних та динамічних моделей, призначених для діагностики і контролю стану двигуна на основі реєстратора польотних даних, із поділом функцій за логічними блоками.

Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

Водночас питання структурованої поетапної побудови діагностичних алгоритмів, які могли б бути інтегровані до існуючих систем аналізу польотної інформації, залишаються недостатньо розробленими. З огляду на наявне програмне рішення аналізу польотних даних «base» розробки АТ «Елемент» [5], постає потреба у формалізованій діагностичній моделі, що дозволяє порівнювати реальні параметри з еталонними та інтерпретувати відхилення у контексті технічного стану двигуна.

Це створює потребу у формалізованому підході до побудови діагностичної моделі, яка дозволить на основі післяпольотної інформації аналізувати відхилення параметрів, ідентифікувати ознаки деградації та оцінювати ступінь ризику подальшої експлуатації.

Постановка задачі дослідження

Об'єктом дослідження є технічний стан газотурбінного двигуна ТВ3-117В, що підлягає оцінці за результатами аналізу післяпольотних параметрів роботи.

Предметом дослідження є методи і структура діагностичної моделі, яка дозволяє оцінити технічний стан ГТД ТВ3-117В за післяпольотними даними.

Метою дослідження є визначення вимог та побудова структурної схеми діагностичного алгоритму, призначеного для обробки експлуатаційних даних авіаційного двигуна в рамках забезпечення надійності його експлуатації.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати наступні етапи:

1. Визначення переліку діагностично значущих параметрів, які фіксуються під час польоту або стендових випробувань та характеризуються діагностичною інформативністю.

2. Розробка загальної структури діагностичної моделі, блоки якої включають режимну ідентифікацію, порівняння ключових параметрів з еталонною поведінкою та логіку оцінювання відхилень.

3. Формулювання критеріїв ідентифікації потенційно небезпечних відхилень на основі порівняння з номінальними режимами, з урахуванням міжпараметричних зв'язків.

Методика дослідження спирається на поєднання методів системного аналізу, багатовимірної обробки даних, режимної класифікації та експертних правил з орієнтацією на подальше програмне впровадження в наявні інструменти експлуатаційного аналізу.

Результати

Формування інформаційної основи моделі

На основі аналізу режимів роботи ГТД ТВ3-117В сформовано інформаційну основу діагностичної моделі. Виокремлено ключові параметри, що реєструються при польоті або стендових випробуваннях і мають діагностичну інформативність. Серед них температура газів за турбіною (Тг), частота обертання ротора компресора (nк), крутний момент (Мкр), витрати палива (Gт), сигнали логічних ознак режимів («Малий газ», «Надзвичайний режим», «Циклограма консервації виконується»).

Для моделі враховано п'ять основних режимів роботи двигуна, такі як «Малий газ», «Крейсерський режим», «Злітний режим», «Режим 2,5-хвилинної потужності», та «Режим консервації/розконсервації».

Параметри розподілено на три групи:

– режимоідентифікуючі, що дозволяють встановити активний режим роботи (Тг, nк, логічні сигнали);

– діагностичні, що змінюються при несправності або деградації (Мкр, Gт, швидкість зміни Тг);

– допоміжні, такі як тривалість режиму, тривалість відхилення, сигнали переходів.

Такий підхід забезпечує основу для формування обґрунтованих критеріїв діагностування та дозволяє відокремити нормальну поведінку двигуна від потенційно небезпечної з високою достовірністю.

Структура діагностичної моделі

Модульна структура діагностичної моделі (рис. 1) реалізує послідовність етапів обробки післяпольотних даних з метою ідентифікації відхилень у роботі ГТД ТВ3-117В. Кожен модуль виконує окрему функцію в рамках загального алгоритму.

У даній структурі вихідні дані (значення параметрів, часові мітки, логічні сигнали) надходять на вхід моделі та спочатку передаються до блоку попередньої обробки. Цей блок виконує виявлення та усунення пропущених або аномальних значень, приведення параметрів до уніфікованих одиниць вимірювання, а також синхронізацію часових рядів.

Оброблені дані спрямовуються до блоку режимної ідентифікації, де на основі логічних сигналів та характеру змін ключових параметрів здійснюється класифікація кожної часової ділянки до одного з визначених режимів роботи двигуна. Визначений режим слугує контекстом для усієї подальшої обробки.

У блоці нормалізації параметрів виміряні значення приводяться до шкали відносно відповідних еталонних значень. Це забезпечує однакову чутливість діагностичних критеріїв до відхилень параметрів різного типу та масштабу. Паралельно блок еталонних характеристик надає нормативні значення ключових параметрів для поточного режиму, включаючи допустимі інтервали та поправочні коефіцієнти.

Обидва потоки надходять у блок порівняння. Тут обчислюється ступінь відхилення кожного параметра, перевіряється відповідність міжпараметричних

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

співвідношень та фіксуються ознаки потенційних порушень. На основі результатів порівняння активується блок формування логічних висновків, який інтерпретує виявлені відхилення з урахуванням їх характеру, тривалості та режимної належності. Результатом роботи моделі є набір логічних діагностичних висновків, що містять індикатори стану двигуна, попередження про нестабільність або ознаки деградації.

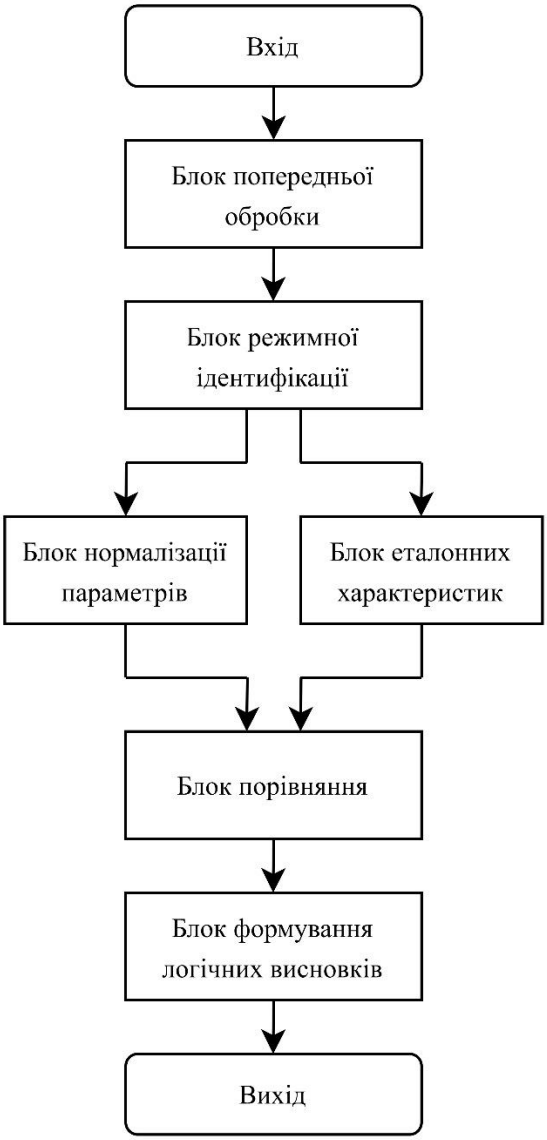

Рис. 1. Структура діагностичної моделі

Така архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість та адаптованість моделі до умов реальної експлуатації, дозволяючи виявляти як локальні відхилення, так і комплексні порушення роботи ГТД.

Режимна ідентифікація

Ідентифікація режиму здійснюється шляхом поетапної перевірки умов, специфічних для кожного з визначених режимів. Для блоку визначення режиму вихідними даними є режимоідентифікуючі параметри nк, Тг, логічний сигнал 2,5-хвилинної потужності 2.5N, а також тривалість здійснення умов t. Алгоритм визначення режиму передбачає почергову перевірку вказаних параметрів на відповідність значень для кожного режиму (рис. 2). Вихідними даними блока є параметр Regime, який відповідає визначеному алгоритмом режиму.

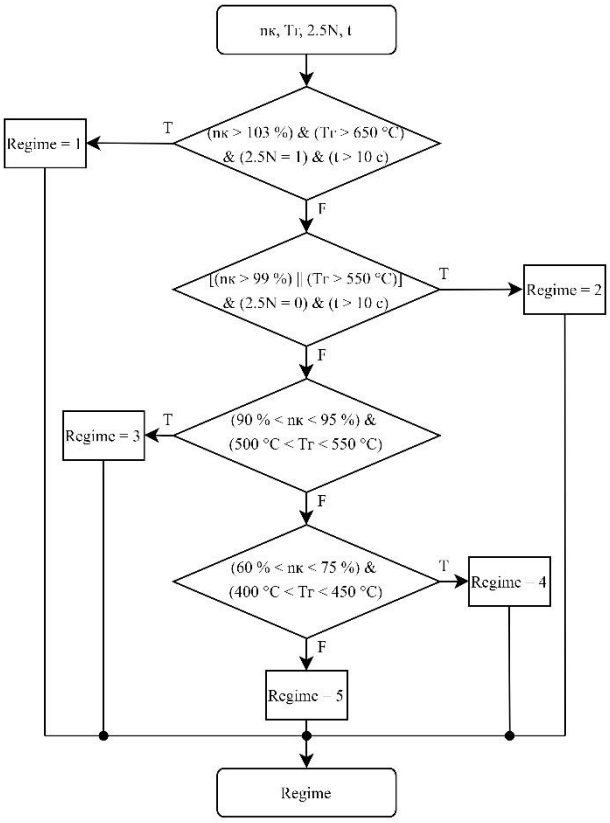

Рис. 2. Алгоритм визначення режиму

У наведеній блок-схемі значення 1 параметра Regime відповідає режиму 2,5-хвилинної потужності, 2 – злітному режиму, 3 – крейсерському, 4 – малому газу, 5 – перехідному режиму.

До блоку порівняння надходять еталонні характеристики параметрів, які відповідають режиму, визначеному у даному блоці.

Формулювання критеріїв ідентифікації потенційно небезпечних відхилень

Критерії ідентифікації потенційно небезпечних відхилень базуються на аналізі відхилень фактичних параметрів від еталонних значень у межах ідентифікованих режимів роботи. Кожен режим має характерну фізичну поведінку параметрів, що дозволяє виділити типові діапазони та допустимі відхилення. Критерії будуються з урахуванням як абсолютних відхилень, так і міжпараметричних зв’язків, а також динаміки змін.

Для кожного режиму формуються локальні критерії, адаптовані під характерні умови роботи. Такий підхід підвищує селективність виявлення відхилень та знижує ймовірність хибних спрацьовувань.

У режимі малого газу основною метою є підтримка стабільності параметрів у допустимих межах, тому в алгоритмі особливу увагу приділено відсутності імпульсного зростання Тг, що може свідчити про нестабільність горіння або деградацію елементів камери згоряння.

На основі аналізу поведінки параметрів у цьому режимі, визначено наступні критерії ідентифікації:

– Тг перевищує 460 °C протягом більше 5 с, що може свідчити про перегрівання;

– Тг зростає більше ніж на 15 °C/с при сталому Gт, що вказує на ймовірну нестабільність згоряння;

– nк виходить за межі допустимого діапазону понад 3 с, причиною чого може бути порушення регуляторного контуру;

– Тг зростає при одночасному зниженні Мкр, що є вірогідним результатом механічного навантаження.

Кожний із зазначених критеріїв фіксується в системі як логічна ознака відхилення, а при їх комбінації формується попередження про потенційно небезпечний стан у поточному режимі.

Зазначений підхід до побудови критеріїв є уніфікованим і застосовується до кожного з основних режимів роботи двигуна. Для режимів формуються власні шаблони очікуваної поведінки, на основі яких діагностична модель здійснює контроль допустимості стану.

Висновки

У роботі запропоновано формалізований підхід до побудови діагностичної моделі ГТД ТВ3-117В для післяпольотного аналізу. Модель орієнтована на структуровану обробку експлуатаційних даних з урахуванням режимної належності кожного інтервалу польоту та забезпечує виявлення потенційно небезпечних відхилень на основі порівняння з еталонною поведінкою параметрів.

На основі аналізу конструктивних і експлуатаційних особливостей двигуна сформовано перелік діагностично значущих параметрів. Розроблено структуру діагностичної моделі, яка реалізує послідовну обробку даних за модулями.

Окрему увагу приділено алгоритму ідентифікації режиму роботи, який базується на поєднанні логічних сигналів та граничних значень основних параметрів. Запропоновано принципи формування критеріїв діагностики, зокрема для режиму «Малий газ», із використанням як абсолютних меж, так і міжпараметричних співвідношень та динамічних ознак.

Запропонована структура діагностичної моделі забезпечує адаптивність до систем експлуатаційного аналізу і може бути використана як основа для подальшої розробки програмного модуля для аналізу експлуатаційних даних двигуна ТВ3-117В.

У наступних дослідженнях доцільно зосередитись на розширенні критеріїв ідентифікації для інших режимів роботи двигуна та реалізації діагностичного алгоритму у вигляді програмного прототипу. Крім того, доцільно розглянути можливість формування діагностичною моделлю узагальнених сценаріїв для типових відхилень.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що він не використовував методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Intelligent fault diagnosis methods toward gas turbine: A review [Text] / L. I. U. Xiaofeng, C. H. E. N. Yingjie, L. Xiong [et al.] // Chinese Journal of Aeronautics. – 2024. – № 37 (4). – P. 93-120.

2. Chen, Z. Remaining useful life estimation of aircraft engines using a modified similarity and supporting vector ma-chine (SVM) approach [Text] / Z. Chen, S. Cao, & Z. Mao // Energies. – 2017. – № 11 (1). – P. 28.

3. Catana, R. M. Analytical Calculation Model of the TV3-117 Tur-boshaft Working Regimes Based on Experimental Data [Text] / R. M. Catana, & G. Dediu // Applied Sciences. – 2023. – № 13 (19). – Article no. 10720.

4. Vladov, S. I. Control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine technical state in flight modes using the matrix method for calculating dynamic recurrent neural networks [Text] / S. I. Vladov, Yu M. Shmelov, & R. P. Yakovliev // CMIS-2021: The Fourth International Workshop

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

on Computer Modeling and Intelligent Systems (Zaporizhzhia, Ukraine, 27 April, 2021). – 2021. – P. 97-109.

5. Волков, Д. И. Оптимизация объёма нереляционной базы данных и времени доступа к данным при множественных частотах регистрации параметров [Текст] / Д. И. Волков, & Н. Н. Лопунова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 7 (151). – С. 107-111. doi: 10.32620/aktt.2018.7.16.

References

1. Xiaofeng, L. I. U., Yingjie, C. H. E. N., Xiong, L., Jianhua, W. A. N. G., Chenshuang, L. U. O., Zhang, L., & Kehuan, W. A. N. G. Intelligent fault diagnosis methods toward gas turbine: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, no. 37 (4), pp. 93–120.

2. Chen, Z., Cao, S., & Mao, Z. Remaining useful life estimation of aircraft engines using a modified similarity and supporting vector machine (SVM) approach. *Energies*, 2017, no. 11 (1), pp. 28.

3. Catana, R. M., Dediu, G. Analytical Calculation Model of the TV3-117 Turboshaft Working Regimes Based on Experimental Data. *Applied Sciences*, 2023, no. 13 (19), article no. 10720.

4. Vladov, S. I., Shmelov, Yu M., Yakovliev. R. P. Control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine technical state in flight modes using the matrix method for calculating dynamic recurrent neural networks. *CMIS-2021: The Fourth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (Zaporizhzhia, Ukraine, 27 April, 2021)*, 2021, pp. 97–109.

5. Volkov, D. I., & Lopunova, N. N. Optimizatsiya ob"ema nerelyatsionnoi bazy dannykh i vremeni dostupa k dannym pri mnozhestvennykh chastotakh registratsii parametrov [Optimization of database size and data access time to store parameters with multiple recording frequencies]. *Aviacijno-kosmichna texnika i texnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2018, no. 7 (151), pp. 107-111. doi: 10.32620/aktt.2018.7.16. (n Russian).

Надійшла до редакції 12.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

DEFINITION OF REQUIREMENTS AND STEPWISE DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC MODEL ALGORITHM FOR THE TV3-117V GAS TURBINE ENGINE

Andrii Dunai

This study presents an approach to the formalized construction of a diagnostic model for the TV3-117V gas turbine engine, aimed at post-flight analysis of operational data. The model is designed to detect potentially hazardous deviations in engine performance based on the comparison of actual parameters with reference values, considering the operating mode. The relevance of developing a dedicated post-flight diagnostic tool is substantiated by considering the specific features of the TV3-117V engine and limitations of existing approaches, which are mostly empirical or statistical and lack structured mode-dependent logic. A set of diagnostically significant parameters (exhaust gas temperature, compressor shaft speed, torque, fuel consumption, and logical signals) is defined and divided into three functional groups: mode-identifying, diagnostic, and auxiliary. A modular structure of the diagnostic model, comprising blocks for preprocessing, mode identification, parameter normalization, reference characteristics, normative comparison, and logical inference generation, is proposed. The mode identification algorithm is based on a combination of logical indicators and key parameter threshold values to detect engine operation in one of five defined modes: ground idle, cruise, takeoff, 2.5-minute power, and preservation/depreservation. Formulating criteria for identifying potentially dangerous deviations is given special attention. Accounting for not only absolute deviations but also inter-parameter relationships and dynamic trends enhances diagnostic reliability. Using the "ground idle" mode as an example, a set of criteria is implemented to detect temperature, torque, and rotor speed instability. The justification for using dedicated templates of reference behavior for each operational mode to enable context-sensitive comparison is provided. The proposed diagnostic model structure lays the groundwork for the further development of an automated expert system for analyzing post-flight engine data.

Keywords: diagnostic model; gas turbine engine; TV3-117V; mode identification; deviation criteria; post-flight analysis.

Дунай Андрій Віталійович – асп., Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна: інженер електронік АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Andrii Dunai – PhD Student of the Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine; Electronic Engineer of JSC "Element", Odesa, Ukraine,
e-mail: adunay99@gmail.com, ORCID: 0009-0009-8639-7777.