

УДК 621.452.3.034

doi: 10.32620/aktt.2022.3.03

В. М. ЖУРАВЛЬОВ¹, Ю. І. ТОРБА¹, Д. В. ПАВЛЕНКО^{1,2}¹ ДП «Івченко - Прогрес», Запоріжжя, Україна² Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВКЛЮЧЕННЯ ФОРСАЖНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД

Предметом дослідження у статті є процес включення форсажної камери згоряння сучасного турбореактивного двоконтурного мотора. Вивчалися параметри включення форсажної камери: пульсації тиску газового потоку між турбінами високого та низького тиску, вібрації корпусу, параметри та характеристики процесу займання паливно-повітряної суміші у форсажній камері. **Метою** є встановлення можливості оцінки включення форсажної камери згоряння за параметрами вібрації як ефективний контрольований параметр і визначення раціональних діапазонів їх вимірювання. **Завдання:** дослідження функції коефіцієнта кореляції у спектральній області та девіації максимуму амплітуди спектральної щільності потужності у різних частотних діапазонах. **Методи,** що використовуються: експериментальний метод вимірювання параметрів вібрації, методи спектрального аналізу та математичної статистики. Отримано такі **результати:** досліджено перспективи застосування методу вимірювання параметрів вібрації корпусу для оцінки ефективності ідентифікації початку роботи форсажних камер згоряння. Досліджено функції коефіцієнта кореляції у спектральній області та девіації максимумів амплітуди спектральної щільності потужності у різних частотних діапазонах. Встановлено оптимальні частотні діапазони та рівень сигналу девіації максимумів амплітуди спектральної щільності потужності для ідентифікації початку роботи форсажних камер згоряння за параметрами вібрації. Показано перспективи подальших досліджень у галузі вібродіагностики камер згоряння. **Висновки.** наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: встановлено, що сигнал датчика вібрації у спектральній ділянці достовірно відображає пульсацію тиску газового потоку у форсажній камері згоряння. Таким чином, його можна застосовувати для адекватного представлення процесу зміни тиску у проточній частині двигуна. Ідентифікацію початку роботи форсажної камери згоряння необхідно проводити, аналізуючи девіацію максимумів амплітуди спектральної щільності потужності або аналізувати девіацію максимумів амплітуди спектральної щільності потужності на певних частотах та рівнях.

Ключові слова: газотурбінний двигун; форсажна камера згоряння; параметри процесу вібрації.

Вступ

Активний розвиток обчислювальної техніки та методів обробки сигналів відкриває сьогодні нові перспективи у сфері контролю параметрів складних технічних систем. Газотурбінні двигуни (ГТД), будучи гранично форсованою тепловою машиною та однією з найскладніших технічних систем, становлять найбільший інтерес для впровадження сучасних методів контролю та діагностики. Наявність ротора складної конструкції, що швидко обертається, швидкі зміни режимів роботи і температури, що досягають в гарячій частині ГТД декількох тисяч градусів, значною мірою ускладнюють діагностику стану його деталей і вузлів, а також газодинамічних процесів у проточній частині і процесів горіння у камері згоряння. Діагностика горіння представляє окрему проблему для конструкторів ГТД у зв'язку зі складністю фізичних процесів та швидкістю їх протікання, а

також високою температурою полум'я. Це значно скорочує коло доступних методів об'єктивного контролю за станом таких вузлів як факельні запалювальники, основна та форсажна камери згоряння. У зв'язку з цим розробка та дослідження непрямих методів аналізу параметрів у камерах згоряння, таких, наприклад, як вібродіагностика, є своєчасним завданням підвищення технічного рівня вітчизняних ГТД. Їх використання дозволить виконувати контроль над станом вузла не тільки в умовах випробувальної станції, а й безпосередньо під час польоту літального апарату. Також вона дозволяє отримувати більш детальну інформацію про стан вузла, порівняно з наявними сьогодні датчиками полум'я.

Постановка задач дослідження

На сьогоднішній день відомі методи та засоби контролю процесів горіння в камері згоряння ГТД за

прямими і непрямими параметрами [1]. Велике поширення набули методи діагностики камер згоряння ГТД на основі математичного моделювання їхнього робочого процесу. В роботі [2] показано ефективність застосування методів математичного моделювання процесів в основних та форсажних камерах згоряння для діагностування їх технічного стану. Запропоновано метод діагностики камер згоряння на основі чисельного моделювання газодинаміки та теплового стану. У ряді робіт поширені також методи контролю теплового поля за камерою згоряння [Ошибка! Источник ссылки не найден., 4]. Для підвищення інформативності методу результати вимірювання температур окремими термодатчиками обробляють із застосуванням самонавчальних алгоритмів [5]. Розробляються також алгоритми контролю вібраційного горіння в камері згоряння, що базуються на обробці сигналів високочастотних датчиків, що вимірюють акустичне тиск в камері згоряння [6]. Ведуться дослідження у галузі вдосконалення існуючих методів контролю та діагностування технічного стану камер згоряння шляхом застосування методики аналізу процесу горіння на основі оцінки хімічного складу вихлопного газу [7]. Розвиваються безконтактні способи виміру температур, зокрема методи оптичної пірометрії. В роботі [8] описано методику спектральної відеозйомки, що дозволяє визначити температурні поля в просторі модельної камери згоряння ГТД. Автори роботи [9] відзначають ефективність експертної системи діагностики несправностей та моніторингу камер згоряння газових турбін заснованої на моніторингу просторового та тимчасового розподілу теплового потоку всередині камери згоряння та одночасному порівнянні відповідних показань діагностичних змінних зі значеннями, отриманими шляхом чисельного моделювання різних ситуацій.

Незважаючи на велику різноманітність існуючих методів контролю процесів у камерах згоряння ГТД, вони знаходять дуже обмежене застосування для ідентифікації початку роботи форсажних камер згоряння на серійних двигунах. Основною причиною цього є складність вимірювального обладнання, що уможливило їх застосування лише в умовах випробувальних станцій.

Одним із перспективних методів, з погляду інформативності та технологічності використання на серійних ГТД, є вібродіагностика. Відомо досить велика кількість досліджень у галузі вібродіагностики роторів ГТД [10 – 12]. Однак, незважаючи на низку переваг вібродіагностики, він знаходить дуже обмежене застосування для контролю процесів горіння [13, 14].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень в області вибору ефективних методів і параметрів контролю роботи камери згоряння ГТД, включаючи факельні запалювальники, основну і форсажну камеру згоряння показує їх недостатню інформативність і надійність. У зв'язку з цим, дослідження перспективного способу оцінки ефективності ідентифікації початку роботи форсажних камер згоряння ГТД за параметрами вібрації є актуальним завданням.

Об'єктом цього дослідження був процес включення форсажної камери згоряння сучасного турбореактивного двоконтурного двигуна. Предметом дослідження були основні параметри включення форсажної камери. Як параметри ефективності роботи використані пульсації тиску газового потоку між турбінами високого та низького тиску, вібрації корпусу, параметри та характеристики процесу займання паливно-повітряної суміші в форсажній камері.

Цілю проведеного дослідження було встановлення можливості оцінки включення форсажної камери згоряння за параметрами вібрації як ефективний контрольований параметр і визначення раціональних діапазонів їх вимірювання. Для досягнення поставленої мети були вирішені завдання пов'язані з дослідженням функції коефіцієнта кореляції в спектральній області та девіації максимумів амплітуди спектральної щільності потужності у різних частотних діапазонах.

Теоретична частина

Ідентифікацію початку роботи форсажної камери згоряння виконували за стрибкоподібним підвищенням тиску газового потоку. Враховуючи високу температуру газового потоку, її вимірювання прямими засобами є важким завданням. У зв'язку з цим різку зміну тиску повітря пов'язували зі зміною температури в наслідок розпалення форсажної камери згоряння. Встановлювали зв'язок між зміною тиску повітря та вібрацією корпусу форсажної камери згоряння.

Як параметр адекватності оцінки ефективності роботи форсажної камери згоряння за параметрами вібрації була прийнята міра інформаційної відстані між двома досліджуваними сигналами $s_1(t)$ і $s_2(t)$, яка розраховувалася як коефіцієнт кореляції між часовою та спектральною моделями процесів. Часова модель працює у просторі часу і визначається виразом:

$$r_t(t) = M \left(\left[\frac{s_1(t) - M[s_1(t)]}{\sigma_{s_1}} \right] \left[\frac{s_2(t) - M[s_2(t)]}{\sigma_{s_2}} \right] \right), \quad (1)$$

$$t \in [\Delta T],$$

де t – поточний час,

$M[*]$ – математичне очікування,

$\Delta T = 30$ мс – інтервал часу вікна аналізу, чисельно рівний часу десяти обертів валу турбіни високого тиску,

σ_{s_1} і σ_{s_2} – дисперсії сигналів $s_1(t)$ і $s_2(t)$ відповідно.

Часова модель (1) чутлива до фази сигналів та виключає опосередкування параметрів на інтервалі часу ΔT вікна аналізу.

Спектральна модель працює у просторі часу та частоти, визначається виразом:

$$r_s(\omega, t) = M \left[\frac{S_1(\omega, t) - M[S_1(\omega, t)]}{\sigma_{s_1}} \right] \cdot \left[\frac{S_2(\omega, t) - M[S_2(\omega, t)]}{\sigma_{s_2}} \right], \quad (2)$$

$$S_i(\omega, t) = \int_0^{\Delta T} R_{xx}[s_i(t)] e^{-j\omega t} dt,$$

$$t \in [\Delta T), \Delta\Omega \in [\omega).$$

Модель (2) чутлива до інформаційної відстані між функціями спектральної густини потужності сигналів $S_i(\omega, t)$, опосередкованих інтегралом автокореляційної функції $R_{xx}[s_i(t)]$ на інтервалі часу ΔT вікна аналізу.

Експериментальна частина

Параметр адекватності непрямого виміру тиску газового потоку досліджували на серійному двигуні, оснащеному допрацьованою форсажною камерою згоряння (рис. 1).

Пульсації тиску газового потоку вимірювали датчиком абсолютного тиску Kulite ХТЕН-10LАС-190М, встановленим між напрямними лопатками турбіни низького тиску та серійним датчиком вібрацій АВС117. Частотний діапазон датчиків складав 10...3000 Гц. Датчики розташовувалися на відстані близько 150 мм друг від друга по осі двигуна. Сигнали датчиків обробляли вимірювальним комплексом МІС-300, який виконував функції первинної цифрової обробки аналогових сигналів з частотою дискретизації 216000 Гц і кількістю рівнів квантування 2^{16} .

Результати досліджень коефіцієнта кореляції (1) у часовій та спектральній областях показані на рис. 2 та 3 відповідно. Додаткову похибку спотворення

форми часової реалізації вносить процес пульсуючої ежекції газів у трубіці монтажу датчика тиску.

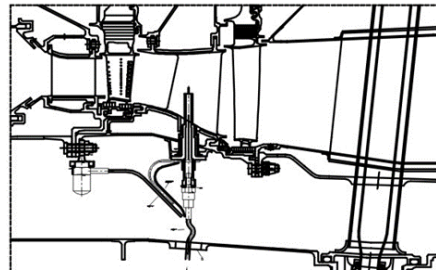


Рис. 1. Схема установки датчика вібрацій на форсажній камері згоряння

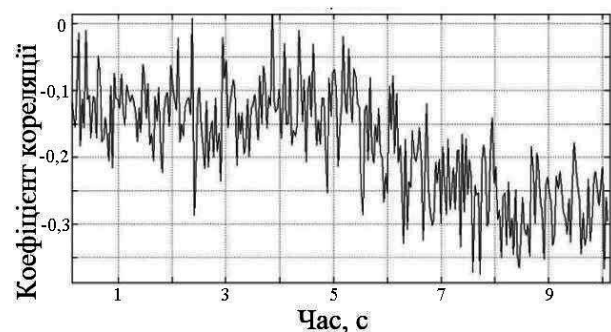


Рис. 2. Функція коефіцієнта кореляції у часовій області

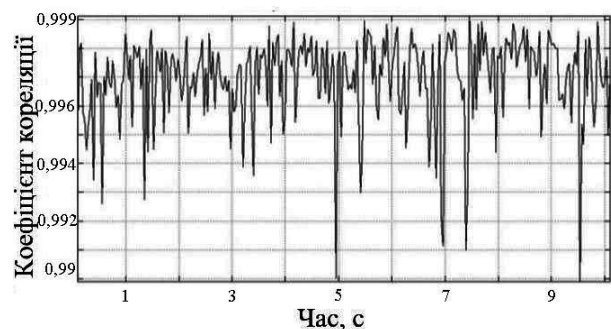


Рис. 3. Функція коефіцієнта кореляції в спектральній області

Аналіз функції коефіцієнта кореляції в спектральній області на частоті лопаток турбіни високого тиску показує майже повну, з математичним очікуванням коефіцієнта кореляції 0,996, повторюваність сигналів датчика вібрацій та датчика тиску.

Таким чином, можна бачити, що сигнал датчика вібрацій у спектральній області майже повністю відображає пульсації тиску газового потоку і може, при необхідності, адекватно представляти процес зміни тиску в проточній частині двигуна. Перед реалізацією непрямих вимірювань тиску необхідне

тарування датчика вібрацій за результатами тензометрування.

Для оцінки ефективності роботи форсажної камери згоряння ГТД за параметрами вібрації досліджували поширення ударної хвилі повітря у процесі її розпалювання. Аналізували девіацію максимумів амплітуди спектральної щільності потужності на різних центральних частотах (рис. 4).

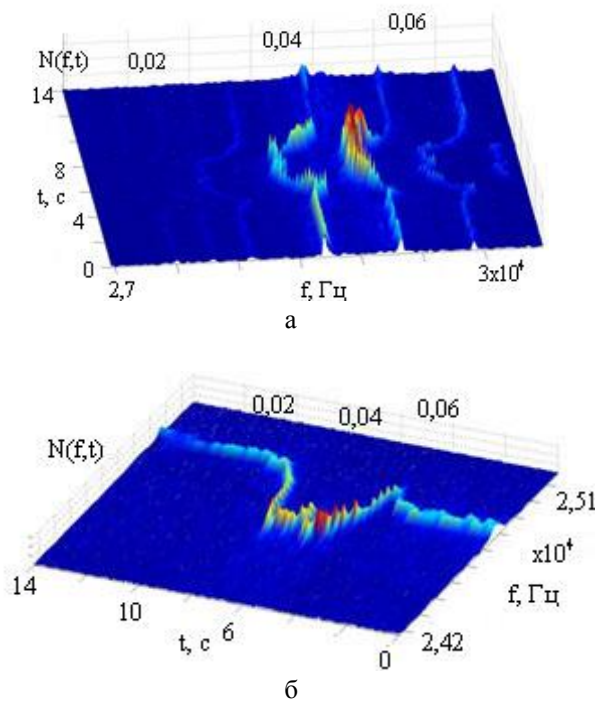


Рис. 4. Девіація максимумів амплітуди спектральної щільності потужності на центральній частоті 27000...30000 Гц (а) та 24200...25100 Гц (б)

Наявність екстремуму девіації максимумів амплітуди спектральної щільності потужності свідчить про її тісну кореляцію з процесами розпалювання форсажної камери згоряння.

Висновки

Таким чином, комплексний аналіз пульсації тиску газового потоку, вібрації корпусу, параметри та характеристики процесу займання палива вказує на ефективність ідентифікації розпалювання форсажних камер згоряння ГТД за параметрами вібрації. Сигнал датчика вібрацій у спектральній області достовірно відображає пульсації тиску газового потоку. Таким чином його можна застосовувати для адекватного представлення процесу зміни тиску в проточній частині двигуна. Цей висновок є особливо важливим при вимірюваннях тиску в зонах високих температур.

Встановлено, що ідентифікацію початку роботи форсажної камери необхідно проводити, аналізуючи девіацію максимумів амплітуди спектральної щільності потужності на центральній частоті 775-785 Гц зі смугою 750-840 Гц за рівнем – 3 дБ, або аналізувати девіацію максимумів амплітуди спектральної щільності потужності на центральній частоті 5200 Гц зі смугою 5100 – 5300 Гц за рівнем – 3 дБ.

У разі програмної реалізації контролера час реєстрації визначається сумою тривалості вікна аналізу 10 - 50 мс. У разі апаратної реалізації фільтра час реєстрації визначається постійною відгуком фільтра (порядку 150 мкс), проте в цьому випадку необхідно враховувати температурну залежність частоти налаштування та операцію переналаштування при зміні конструкції деталей вузла форсажної камери.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з поширенням застосування технології вібродіагностики з метою оцінки роботи факельних запалювальників ГТД та основних камер згоряння.

Література

1. *Combustion Diagnostics [Text] / C. Schulz, A. Dreizler, V. Ebert, J. Wolfrum // Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics / C. Tropea, A. L. Yarin, J. F. Foss (eds). – Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 1241-1315. DOI: 10.1007/978-3-540-30299-5_20.*
2. Зырянов, А. В. *Разработка метода диагностики камер сгорания ГТД на основе математического моделирования их рабочего процесса [Текст] / А. В. Зырянов, Н. С. Сенюшкин, В. Ф. Харитонов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, №2 (47). – С. 98-105.*
3. Khosravy el_Hossaini, M. *Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines [Text] / M. Khosravy el_Hossaini // Progress in Gas Turbine Performance. – Intech Open, 2013. – 16 p. DOI: 10.5772/54403.*
4. *A fault diagnosis approach for gas turbine exhaust gas temperature base on fuzzy c-means clustering and support vector machine [Text] / Z. Wang, N. Zhao, W. Wang, R. Tang, S. Li // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 240267. – 11 p. DOI: 10.1155/2015/240267.*
5. Tretyakov, D. *A Self-Learning Diagnosis Algorithm Based on Data Clustering [Text] / D. Tretyakov // Intelligent Control and Automation. – 2016. – Vol. 7, No. 3. – P. 84-92. DOI: 10.4236/ica.2016.73009.*
6. Матюгин, Ф. В. *Технические решения для контроля вибрационного горения в камере сгорания газовой турбины [Текст] / Ф. В. Матюгин, М. Н. Старых, Д. В. Третьяков // Газотурбинные технологии. – 2016. – № 8. – С. 16–20.*

7. Аппаратура для измерения фракционного и химического состава нелетучих частиц в продуктах эмиссии газотурбинных двигателей [Текст] / А. Н. Саженьков, А. М. Сипатов, В. В. Цатиашвили, Т. В. Абрамчук, А. К. Петров, А. С. Козлов, М. В. Панченко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 62. – С. 20-30. DOI: 10.15593/2224-9982/2020.62.03.

8. Спектрозональная диагностика процессов горения порошкообразного алюминия в воздушном потоке [Текст] / А. С. Бурков, Д. А. Ягодников, А. В. Сухов, В. И. Томак // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 10(70) – С. 1-9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1686.

9. An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers [Text] / N. H. Afgan, M. G. Carvalho, P. A. Pilavachi, A. Tourlidakis, G. G. Olkhonski, N. Martins // Applied Thermal Engineerin. – 2006. – Vol. 26, Iss. 7. – P. 766-771. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.04.020.

10. Ванчин, А. Г. Диагностика технического состояния основных узлов газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации с использованием данных индивидуальных заводских стендовых испытаний [Текст] / А. Г. Ванчин // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 4. – С. 483-490.

11. Novel cyclo-nonstationary indicators for monitoring of rotating machinery operating under speed and load varying conditions [Text] / A. Mauricio, D. Helm, M. Timusk, J. Antoni, K. Gryllias // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2022. – Vol. 144, Iss. 4. – P. 24-40. DOI: 10.1115/1.4049778.

12. Kochergin, A. V. Vibroacoustic control of technical conditions of GTE [Text] / A. V. Kochergin, N. V. Pavlova, K. A. Valeeva // Paper presented at the Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 363-369. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.723.

13. Применение средств вибрационной диагностики для защиты от вибрационного горения [Текст] / С. В. Лозня, С. С. Некрасов, В. Г. Соляник, М. И. Торхов, А. В. Френев, В. Н. Якунин // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 4 (20). – С. 57-60.

14. Торхов, М. И. Метод выявления вибрационного горения топлива в камерах сгорания газотурбинных установок [Текст] / М. И. Торхов, С. В. Лозня, Н. Б. Налесный // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10 (36). – С. 103-106.

2. Zyryanov, A. V. Senyushkin, N. S., Haritonov, V. F. Razrabotka metoda diagnostiki kamer sgoraniya GTD na osnove matematicheskogo modelirovaniya ih rabocheho processa [Development of a method for diagnosing gas turbine engine combustion chambers based on mathematical modeling of their working process] Vestnik UGATU, 2012, vol. 16, no. 2 (47), pp. 98-105 (in Russian).

3. Khosravy el_Hossaini, M. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines. Progress in Gas Turbine Performance, Intech Open, 2013. 16 p. DOI: 10.5772/54403.

4. Wang, Z., Zhao, N., Wang, W., Tang, R., Li, S. A fault diagnosis approach for gas turbine exhaust gas temperature base on fuzzy c-means clustering and support vector machine. Mathematical Problems in Engineering, 2015, vol. 2015, article id 240267. 11 p. DOI: 10.1155/2015/240267.

5. Tretyakov, D. A Self-Learning Diagnosis Algorithm Based on Data Clustering. Intelligent Control and Automation, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 84-92. DOI: 10.4236/ICA.2016.73009.

6. Matyugin, F. V., Staryh, M. N., Tretyakov, D. V. Tehnicheskie resheniya dlya kontrolya vibracionnogo gorenija v kamere sgoraniya gazovoj turbiny [Technical solutions for controlling vibration combustion in the combustion chamber of a gas turbine]. Gazoturbinnye tehnologii, 2016, no. 8, pp. 16-20 (in Russian).

7. Sazhenkov, A. N., Sazhenkov, A. N., Sapatov, A. M., Catiashvili, V. V., Abramchuk, T. V., Petrov, A. K., Kozlov, A. S., Panchenko, M. V. Apparatura dlya izmereniya frakcionnogo i himicheskogo sostava neletuchih chastic v produktah emissii gazoturbinnih dvigatelej [Equipment for measuring the fractional and chemical composition of non-volatile particles in the emission products of gas turbine engines]. Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tehnika, 2020, no. 62. pp. 20-30. DOI: 10.15593/2224-9982/2020.62.03 (in Russian).

8. Burkov, A. S., Burkov, A. S., Yagodnikov, D. A., Suhov, A. V., Tomak, V. I. Spektrozonalnaya diagnostika processov gorenija poroshkoobraznogo alyuminiya v vozdushnom potoke [Spectrozonally diagnostics of combustion processes of powdered aluminum in an air flow]. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii, 2017, no. 10(70), pp. 1-9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1686 (in Russian).

9. Afgan, N. H., Carvalho, M. G., Pilavachi, P. A., Tourlidakis, A., Olkhonski, G. G., Martins, N. An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers Applied Thermal Engineerin, 2006, vol. 26, iss. 7, pp. 766-771. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.04.020.

10. Vanchin, A. G. Diagnostika tehničeskogo sostoyaniya osnovnyh uzlov gazoturbinnih dvigatelej gazoperekachivayushih agregatov v usloviyah ekspluatatsii s ispolzovaniem dannyh individualnyh zavodskih stendovyh ispytanij [Diagnostics of the technical condition of the main components of gas

References

1. Schulz, C., Dreizler, A., Ebert, V., Wolfrum, J. Combustion Diagnostics. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 1241-1315. DOI: 10.1007/978-3-540-30299-52_0.

turbine engines of gas compressor units under operating conditions using the data of individual factory bench tests]. *Neftegazovoe delo*, 2012, no. 4. pp. 483-490.

11. Mauricio, A., Helm, D., Timusk, M., Antoni, J., Gryllias, K. Novel cyclo-nonstationary indicators for monitoring of rotating machinery operating under speed and load varying conditions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2022, vol. 144, iss. 4, pp. 24-40. DOI: 10.1115/1.4049778.

12. Kochergin, A. V., Pavlova, N. V., Valeeva, K. A. Vibroacoustic control of technical conditions of GTE. *Paper presented at the Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 363-369. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.723.

13. Loznya, S. V., Nekrasov, S. S., Solyanik, V. G., Torhov, M. I., Frenev, A. V., Yakunin, V. N. Primenenie sredstv vibracionnoj diagnostiki dlya zashity ot vibracionnogo gorenija [Application of means of vibration diagnostics for protection against vibration burning]. *Vibracii v tehnikе i tehnologiyah*, 2001, no. 4 (20), pp. 57–60. (in Russian).

14. Torhov, M. I., Loznya, S. V., Nalesnyj, N. B. Metod vyyavleniya vibracionnogo gorenija topliva v kamerah sgoraniya gazoturbinnnyh ustanovok [Method for detecting vibrational combustion of fuel in combustion chambers of gas turbine installations]. *Aviacijno-kosmicna tehnikа i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2006, no. 10 (36), pp. 103-106. (in Russian).

Надійшла до редакції 03.04.2022, розглянута на редколегії 16.05.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВКЛЮЧЕНИЯ ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

В. Н. Журавлев, Ю. И. Торба, Д. В. Павленко

Предметом исследования в статье является процесс включения форсажной камеры сгорания современного турбореактивного двухконтурного мотора. Изучались параметры включения форсажной камеры: пульсации давления газового потока между турбинами высокого и низкого давления, вибрации корпуса, параметры и характеристики процесса воспламенения топливно-воздушной смеси в форсажной камере. **Целью** является установление возможности оценки включения форсажной камеры сгорания по параметрам вибрации в качестве эффективного контролируемого параметра и определения рациональных диапазонов их измерения. **Задачи:** исследование функции коэффициента корреляции в спектральной области и девиации максимума амплитуды спектральной плотности мощности в различных частотных диапазонах. Используемыми **методами** являются: экспериментальный метод измерения параметров вибрации, методы спектрального анализа и математической статистики. Получены следующие **результаты:** исследованы перспективы применения метода измерения параметров вибрации корпуса для оценки эффективности идентификации начала работы форсажных камер сгорания. Исследованы функции коэффициента корреляции в спектральной области и девиации максимумов амплитуды спектральной плотности мощности в различных частотных диапазонах. Установлены оптимальные частотные диапазоны и уровень сигнала девиации максимумов амплитуды спектральной плотности мощности для идентификации начала работы форсажных камер сгорания по параметрам вибрации. Показаны перспективы дальнейших исследований в области вибродиагностики камер сгорания. **Выводы.** научная новизна полученных результатов состоит в следующем: установлено, что сигнал датчика вибраций в спектральной области достоверно отражает пульсацию давления газового потока в форсажной камере сгорания. Таким образом, его можно применять для адекватного представления процесса изменения давления в проточной части двигателя. Идентификацию начала работы форсажной камеры сгорания необходимо проводить, анализируя девиацию максимумов амплитуды спектральной плотности мощности или анализировать девиацию максимумов амплитуды спектральной плотности мощности на определенных частотах и уровнях.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; форсажная камера сгорания; параметры процесса вибрации.

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE PROCESS OF TURNING ON THE AFTERBURNER OF GTE

Volodymir Zhuravlov, Yuriy Torba, Dmytro Pavlenko

The **subject** of research in this article is the process of turning on the afterburner combustion chamber of a modern turbojet bypass engine. The parameters of switching in the afterburner were studied: pressure pulsations of the gas flow between the high- and low-pressure turbines, causing vibrations, parameters, and characteristics of the process of ignition of the fuel-air mixture in the afterburner. The **goal** is to establish the possibility of evaluating the inclusion of an afterburner in terms of vibration parameters as effective controlled parameters and determine rational ranges for their measurement. **Tasks:** the study of the function of the correlation coefficient in the spectral region and the deviation of the maximum amplitude of the power spectral density in different frequency ranges. The **methods** used are an experimental method for measuring vibration parameters, methods of spectral analysis, and mathematical statistics. The following **results** were obtained: the prospects for using the method for measuring the parameters of

the casing vibration to assess the effectiveness of identifying the start of operation of the afterburner combustion chambers of the gas turbine engine were studied. The functions of the correlation coefficient in the spectral region and the deviation of the amplitude peaks of the power spectral density in different frequency ranges are studied. The optimal frequency ranges and the signal level of the deviation of the amplitude peaks of the power spectral density were established to identify the start of operation of the afterburner combustion chambers of the gas turbine engine by vibration parameters. The prospects for further research in the field of vibration diagnostics of combustion chambers are shown. **Conclusions:** the scientific novelty of the results obtained is as follows: it has been established that the signal of the vibration sensor in the spectral region reliably reflects the pressure pulsation of the gas flow in the afterburner. Thus, it can be used to adequately represent the process of pressure change in the engine flow path. Identification of the start of operation of the afterburner must be carried out by analyzing the deviation of the power spectral density amplitude maxima or analyzing the deviation of the power spectral density amplitude maxima at certain frequencies and levels.

Keywords: gas turbine engine; afterburner; vibration process parameters.

Журавльов Володимир Миколайович – д-р техн. наук, начальник відділу, ДП "Івченко-Прогрес", Запоріжжя, Україна.

Торба Юрій Іванович – канд. техн. наук, начальник експериментально-випробувального комплексу, ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Павленко Дмитро Вікторович – д-р техн. наук, провідний інженер експериментально-випробувального комплексу, ДП «Івченко-Прогрес»; доц., проф. каф. технології авіаційних двигунів, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Volodymyr Zhuravlyov – DSc., Head of department SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: ws50@i.ua, ORCID: 0000-0001-6376-2879.

Yury Torba – Ph.D., Head of Experimental Research Complex SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049.

Dmytro Pavlenko – DSc., leading engineer of Experimental Research Complex SE "Ivchenko-Progress"; Assoc. Prof., Prof. Department of Aircraft Engine Technology, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6376-2879.