

Ю.В. Чепурний, Б.З. Мартинець

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ПО ПРЯМОМУ СПЕКТРУ ВІБРАЦІЇ

У статті розглянуті коливальні процеси вузлів, що генерують вібрації в газотурбінного двигуна (ГТД). Розроблена методика виявлення первинного технічного стану вузлів авіаційних силових установок (АвСУ) за допомогою прямого спектру вібрації. Формалізована процедура визначення технічного стану вузлів і агрегатів ГТД по зіставленню двох спектрограм спектрального аналізу сигналів вібрації, що отримані за допомогою вузьконаправленого віброперетворювача. Методом дослідження є порівняння двох спектрограм вібростану вузлів ГТД. За допомогою вузьконаправленого віброперетворювача, порівняння та аналізу лінійних спектрів вібрації двигуна, отримали діагностичну інформацію про стан збірки (міри зносу) вузлів і механізмів, що входять до складу газотурбінної силової установки.

Ключові слова: коливальня; вібрація; процедура; резонанс; спектрограма; технічна діагностика.

Вступ

Постановка проблеми. Під час дослідження вібрації і шуму ГТД розглядається як складна динамічна система, що складається з кінцевого числа взаємозв'язаних і взаємодіючих елементів, вузлів і систем, через які відбувається передача коливань від одного вузла до іншого на корпус ГТД і ЛА. Зазвичай ними служать циліндрові і конічні оболонки, підкоси, лопатки статорів, які сполучені відповідним чином між собою і є середовищем, по якому поширюється сигнал від місця його виникнення до приймача інформації (точки наведення вузьконаправленого мікрофону).

Основною проблемою в цьому випадку є проблема виявлення в спектрі інформації, що визначає наявність, вигляд і рівень пошкодження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З достатньою для практики точністю, канали зв'язки, через які здійснюється передача вібрацій у багатьох випадках, можна розглядати як лінійні і стаціонарні [1–4].

Спектр у місці реєстрації вібрації містить складові вібрацій всіх елементів конструкції каналів і, отже, відображає віброакустичні характеристики ГТД, його систем і вузлів.

Оскільки амплітудно-частотні характеристики каналів залежать від їх технічного стану і змінюються залежно від рівня пошкодження, то спектр відображає їх фактичний технічний стан у момент реєстрації [5–12]. Тому спектри вібрації ГТД з різними рівнями пошкодження відрізнятимуться один від одного. Тобто спектр вібрації, будучи характеристикою вібраційного стану ГТД, одночасно характеризує рівень його працездатності.

Мета статті – оцінити зміну технічного стану каналів передачі коливань і, відповідно, рівень працездатності ГТД по зміні спектру вібрації.

Вклад основного матеріалу

Вживання спектрального аналізу сигналів має велике значення в справі діагностики авіаційних ГТД. Використання як чутливий елемент безконтактного вузьконаправленого віброперетворювача в системі портативної вібродіагностики дозволяє реалізувати всі переваги спектрального аналізу сигналів вібрації в широкій смузі частот.

Вузьконаправлений віброперетворювач, як показав досвід його використання, дозволяє виробляти вимір сигналів вібрації аж до частот 30–50 кГц. Це робить набагато ефективнішим (порівняно з п'єзоелектричним вібродатчиком) вживання алгоритму спектрального аналізу.

Підкреслимо, що за своєю суттю спектральним аналізом є розділення загального сигналу вібрації на окремі частотні компоненти. Таким чином, результатом спектрального аналізу є графік залежності амплітуди сигналу від частоти.

Таке розділення сигналу на окремі компоненти дозволяє оцінити вклад кожної гармоніки в загальну вібрацію ГТД. Зіставлення кінематичної і аеродинамічної схеми ГТД, що діагностується, або агрегату (шляхом розрахунку частот вимушених коливань) із спектром сигналу вібрації можна визначати несправності, що діють в динамічних системах, з яких складається двигун.

Крім того, шляхом зіставлення спектрів вібрації, що виміряні через певні проміжки часу можна судити про зміну вібростану двигуна. Це є одним з елементів прогнозування і діагностики.

Для цілей вібродіагностики авіаційних ГТД використовуються спектри двох видів: побудовані в лінійному масштабі і спектри, побудовані в логарифмічному масштабі. Вживання лінійного масштабу має велике значення при аналізі спектру в області низьких частот. Це пов'язано з тим, що вузьконаправлений віброперетворювач видає сигнал в одиницях тиску (який у свою чергу легко переводиться у віброшвидкість за допомогою перерахунку на чутливість вібродатчика), що робить зручним загальноприйнятій аналіз компонентів вібрації в цій смузі частот.

Із зростанням частоти, вібрації амплітуди віброшвидкості гармонік знижуються, і їх стає важко розрізнити на спектрі, використовуючи загальний масштаб з компонентами низькочастотної області. Вживання логарифмування дозволяє збільшити рівень гармонік в області високих частот, що полегшує виявлення складових, які мають низьку амплітуду вагання.

Крім того, вживання логарифмічного масштабу відображення спектру також дозволяє збільшити рівні шумових складових, що може бути корисне при діагностуванні, наприклад, апаратів лопаток.

Аналіз шумових компонентів також має велике значення при діагностиці стану вузлів редукторів і підшипникових, з огляду на те, що сили тертя, що генерують їх, і їх зміна в процесі роботи механізму дозволяють визначати дефекти, що розвиваються, які просто будуть непомітні в загальному спектрі вібрації зважаючи на крихту амплітуд, збуджуваних ними коливань.

Для прикладу на рис.1 представлений спектр вібрації розділового корпусу ТРДД Д-30КУ-154 при роботі на малому газі, побудований в лінійному масштабі. На рис. 2 показаний той же спектр, лише побудований в логарифмічному масштабі.

При порівнянні спектрів видно, що використання лінійного спектру найефективніше в області низьких частот, оскільки дозволяє оцінити в одиницях віброшвидкості вібрацію, що виникає від дисбалансу роторів і агрегатів, що обертаються, яка є визначальною в цьому діапазоні частот. Також вживання лінійного спектру може бути ефективним при аналізі аеродинамічної вібрації, що генерується завдяки взаємодії потоку повітря, що виходить з міжлопаткових каналів робочих коліс КНД, з деталями статора.

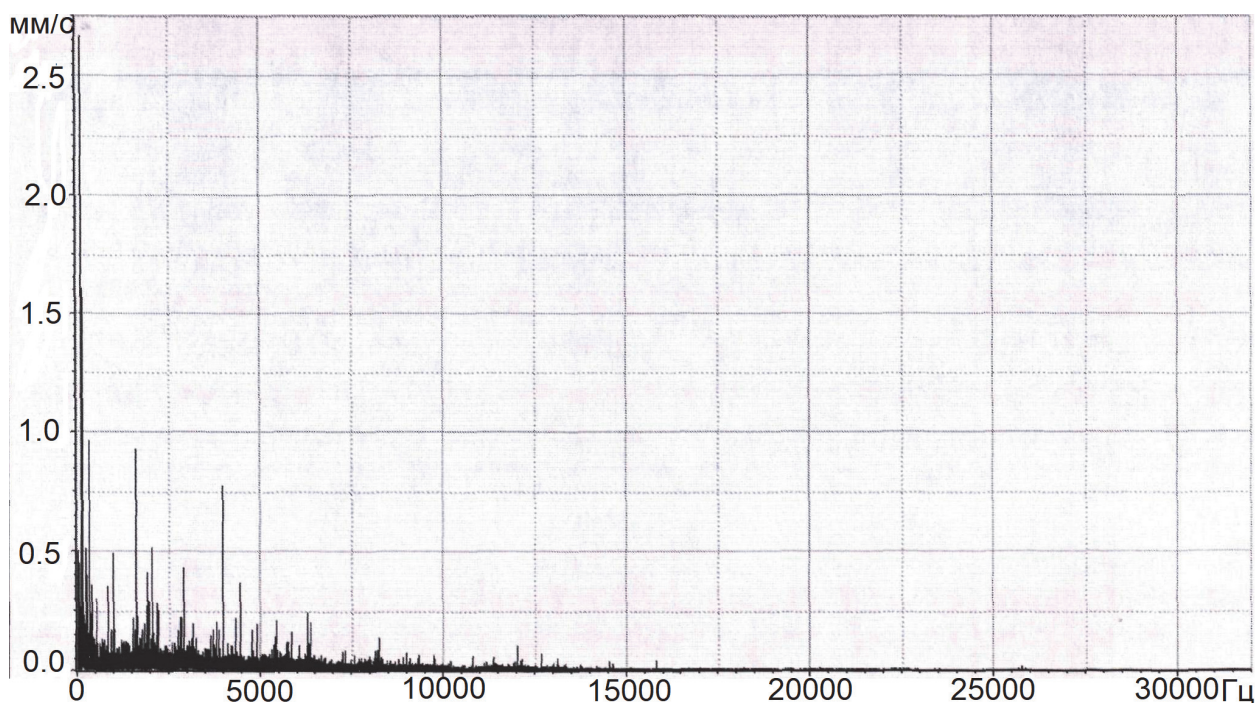


Рис. 1. Спектр вібрації розділового корпусу ТРДД Д-30КУ-154, побудований в лінійному масштабі

Вживання лінійного спектру зберігає свою діагностичну ефективність до частот 2–4 кГц. Далі стає ефективнішим використання логарифмічного масштабу при побудові спектру вібросигналу.

Вживання лінійного широкосмугового спектру може бути корисним при оцінці загального вібростану досліджуваного вузла. У таких випробуваннях лінійний спектр “зразкового” механізму може бути

взятий за основу при оцінці вібростану подальших виробів у партії. Це є найбільш важливим внаслідок того, що амплітуди дискретних складових є найбільш сильними в спектрі вібрації, а кінематичні пари і механізми, які їх генерують, є найвідповідальнішими у складі силової установки. З огляду на вище зазначене, порівняння лінійних спектрів вібрації двигунів є важливою діагностичною

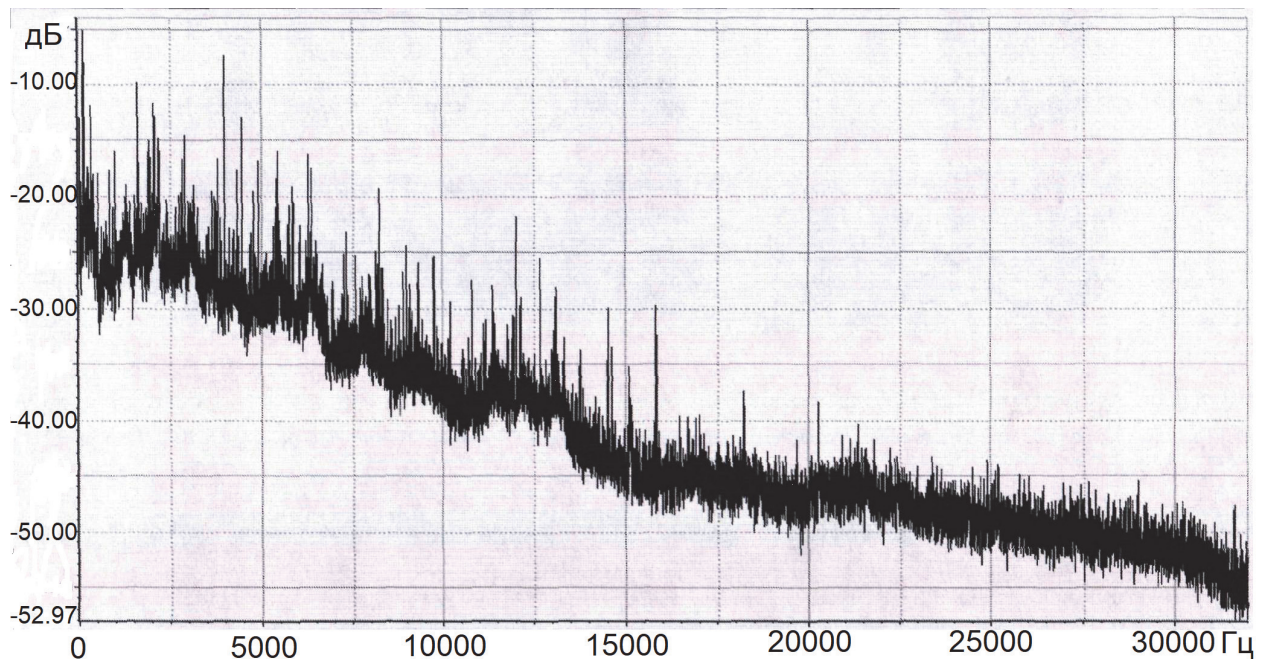


Рис. 2. Спектр того ж вузла, але побудований в логарифмічному масштабі

інформацією про якість збірки і міри зносу вузлів і механізмів, що входять до складу газотурбінної силової установки.

Використання широкопasmових спектрів, що побудовані в логарифмічному масштабі, дозволяє визначати дефекти в роботі вузлів лопаток і кінематичних пар (наприклад, зубчастих з'єднань).

Використання вузьконаправленого віброперетворювача, як першоджерела діагностичної інформації, дозволяє проводити спектральний аналіз в широкій смузі частот, що є особливо коштовним при діагностуванні малогабаритних силових установок. Це пов'язано з тим, що спектр сигналу вібрації, що генерується ними, є широкопasmовим і поширюється в частотній області аж до частот 40–50 кГц.

Враховуючи вище зазначене, прямий спектр вібрації є хорошим інструментом для постановки попереднього діагнозу.

Найбільш сильний відгук в прямому спектрі знаходять розвинені дефекти, сигнали яких можуть бути визначені на тлі перешкод спектру загального сигналу вібрації. До таких дефектів відносяться: знос вузлів лопаток, удари в зачепленні зубчастих передач, знос підшипників ротора (визначається непрямою дорогою по амплітудній модуляції гармонік лопаток рівнів, що розташовані в безпосередній близькості від підшипника).

Слід також брати до уваги ту обставину, що можливість виявлення дефектів пов'язана з віддаленістю точки виміру вібрації.

Чим далі точка виміру вібрації знаходиться від вузла, що діагностується, тим нижча вірогідність виявлення дефектів механізму по прямому спектру, зважаючи на швидке загасання високочастотних сигналів, що генеруються дефектними вузлами.

На рис. 3 приведений логарифмічний спектр вібрації другої опори лівого ТВаД ТВ3-117 вертольота Мі-8МТВ, що має знос лопаток останніх рівнів компресора. Про знос лопаток 6-го рівня і лопаток 7–12 рівнів (на цих рівнях встановлено однакове число робочих лопаток – 89) свідчить наявність амплітудної модуляції частот лопаток даних рівнів випадковим шумом. На рис.4 для порівняння представлений спектр вібрації двигуна з незначним зносом лопаток.

Наявність модуляції вагання (яким в даному випадку є частоти лопаток 6 рівнів компресора і сумарна гармоніка 7–12 рівнів), що несе, широкопasmовим шумом говорить про те, що лопатки обтікаються дуже сильно турбулізованим потоком повітря. Ця підвищена (вихрова) турбулізація пов'язана з ерозійним зносом кромки лопаток, який веде до утворення мікрозабігів на їх кромках. Наявність мікрозабігів приводить до появи місцевих завихрень при обтіканні пера лопаток повітряним потоком. Місцеві завихрення змінюють випадковим чином картину розподілу тиску і щільності повітря, тобто фактично модулюють витрату повітря в міжлопаткових каналах.

Випадкова зміна витрати (маси відкиданого повітря) і приводить до модуляції частоти лопатки шумовим процесом. На рис. 4 приведений спектр вібрації правого двигуна, що не має зносу лопаток цих рівнів компресора. На даному вертольоті при проведенні вимірів правий двигун був встановлений після виконання на ньому капітального ремонту, а ресурс лівого двигуна був продовжений. Крім того, вертоліт до вступу в ремонт експлуатувався, без пило захищеного пристрою (ПЗП), що зробило знос лопаток останніх рівнів найбільш очевидним.

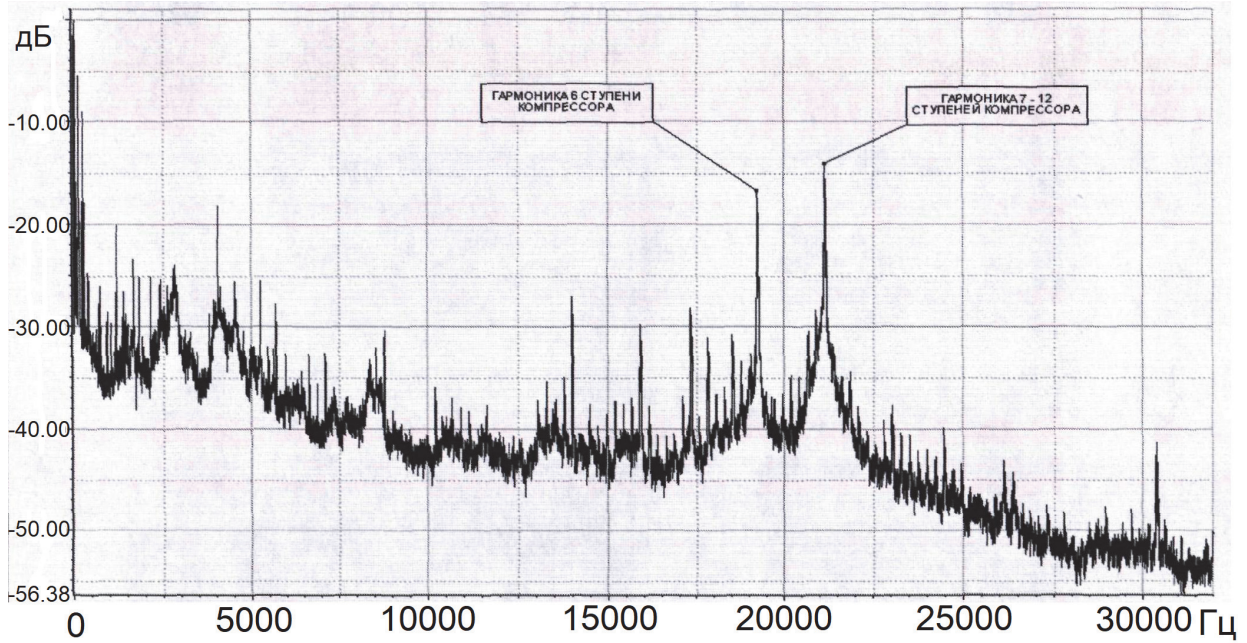


Рис. 3. Спектр вібрації другої опори ТВаД ТВ3-117, що має знос лопаток останніх рівнів компресора

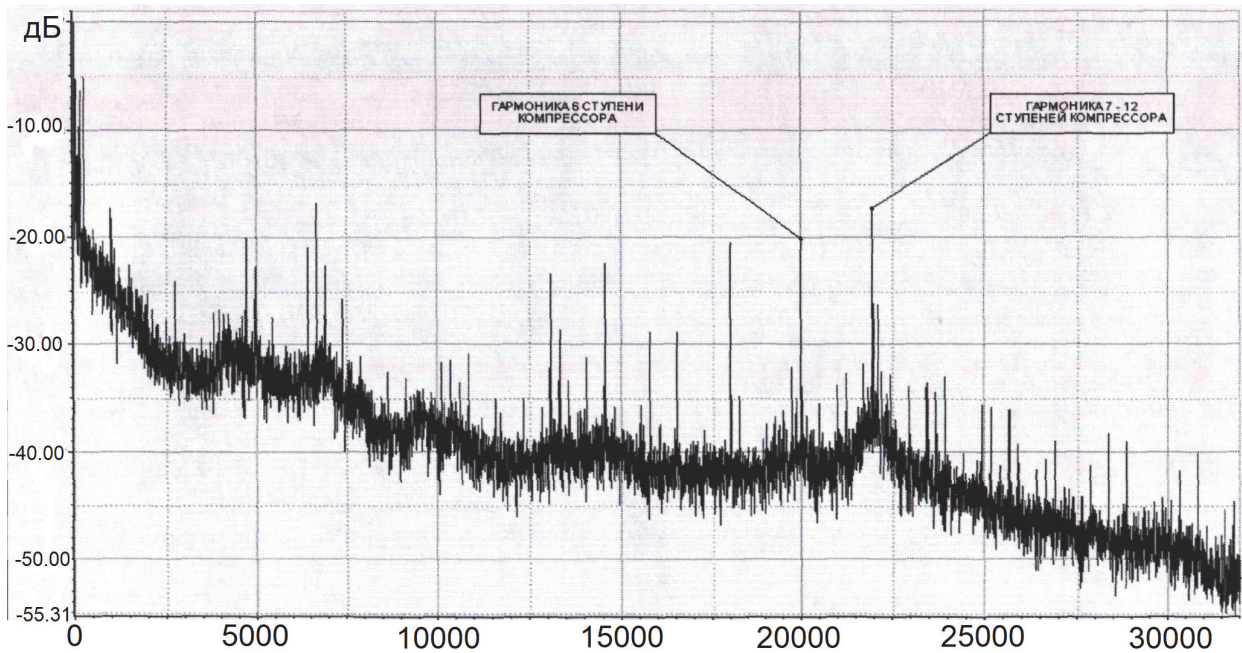


Рис. 4. Спектр вібрації другої опори ТВаД ТВ3-117 без зносу лопаток

Такий сильний вплив ерозійного зносу на спектр вібрації двигуна обумовлений крихтою хорди лопаток компресора (особливо лопаток його останніх рівнів), що приводить до збільшення відносного вагання тиску на виході з робочого колеса.

Висновки

У статті запропонований метод діагностики авіаційних ГТД по прямому спектру вібрації, який на відміну від існуючих, відображає реальний первинний технічний стан двигуна.

В ході дослідження, за допомогою вузьконаправленого віброперетворювача та аналізу спектрів,

отримали підтвердження, тому що даний тип двигуна володіє широкосмуговим спектром, який поширюється уздовж осі частот до значень 25 кГц і вище. Слід також узяти до уваги те, що двигуни під час вимірів працювали на режимі малого газу. При переведенні їх на крейсерський режим частотний діапазон розширюється до 50 кГц. Це і визначає виняткову роль вузьконаправленого віброперетворювача, як інструменту для здобуття високочастотного сигналу з достатньою точністю, як по частотному, так і по амплітудному складу гармонік, що входять в спектр сигналу вібрації.

Список літератури

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций / А.С. Никифоров. – Ленинград: Судостроение, 1990. – 200 с.
2. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин приводов / А.С. Гольдин. – Москва: Машиностроение, 1999. – 344 с.
3. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
4. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. Карасёв В.А. Доводка эксплуатируемых машин. Виброакустические методы / В.А. Карасёв, А.Б. Ройтман. – М.: Машиностроение, 1986. – 185 с.
6. Максимов В.П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В.П. Максимов, И.В. Егоров, В.А. Карасёв. – Самара: Машиностроение, 1987. – 208 с.
7. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.
8. Основы цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьёва. – СПб.: БХВ, 2005. – 768 с.
9. Сиротин Н.Н. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Н.Н. Сиротин, Ю.М. Коровкин. – М.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
10. Богданов А.Д. Турбовальный двигатель ТВЗ-117ВМ / А.Д. Богданов, Н.П. Калинин, А.И. Кривко. – М.: Воздушный транспорт, 2000. – 392 с.
11. Mobely K. Root cause failure analysis / K. Mobely. – Elsevier: Newnes, 1999. – 296 p.
12. Scheffer C. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance / C. Scheffer, C. Girdhar. – Elsevier: Newnes, 2004. – 272 p.

References

1. Nikiforov, A.S. (1990), “*Akusticheskoe proektirovanie sudovykh konstruksii*” [*Acoustic design of ship structures*], Sudostroenie, Lenynhrad, 200 p.
2. Goldin, A.S. (1999), “*Vibratsiya rotornykh mashin privodov*” [*Vibration rotary drive machines*], Mashinostroenie, Moscow, 344 p.
3. Balitskii, F.Y., Ivanova, M.A., Sokolova, A.G. and Khomyakov, E.I. (1984), “*Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikhsya defektov*” [*Vibroacoustic diagnostics of incipient defects*], Nauka, Moscow, 120 p.
4. Genkin, M.D. and Sokolova, A.G. (1987), “*Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov*” [*Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms*], Mashinostroenie, Moscow, 288 p.
5. Karasev, V.A. and Roitman, A.B. (1986), “*Dovodka ekspluatiruemykh mashin. Vibroakusticheskie*” [*Finishing of the operated machines. Vibroacoustic methods*], Mashinostroenie, Moscow, 185 p.
6. Maksimov, V.P., Egorov, I.V. and Karasev, V.A. (1987), “*Izmerenie, obrabotka i analiz bystroperemennykh protsessov v mashinakh*” [*Measurement, processing and analysis of fast-varying processes in machines*], Mashinostroenie, Samara, 208 p.
7. Doroshko, S.M. (1984), “*Kontrol i diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinykh dvigatelei po vibratsionnym parametram*” [*Monitoring and diagnosing the technical condition of gas turbine engines by vibration parameters*], Transport, Moscow, 128 p.
8. Solonina, A.I., Ulakhovich, D.A., Arbuzov, S.M. and Soloveva, E.B. (2005), “*Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov*” [*The Basics of Digital Signal Processing*], BKhV, Peterburg, 768 p.
9. Syrotyn, N.N. and Korovkyn, Y.M. (1979), “*Tekhnicheskaya diagnostika aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei*” [*Technical diagnostics of aircraft gas turbine engines*], Mashinostroenie, Moscow, 272 p.
10. Bohdanov, A.D., Kalynyn, N.P. and Kryvko, A.Y. (2000), “*Turbovalnyi dvigatel TVZ-117VM*” [*Turboshaft engine TVZ-117VM*], Vozdushnyi transport, Moscow, 392 p.
11. Mobely, K. (1999), *Root cause failure analysis*, Newnes, Elsevier, 296 p.
12. Scheffer, C. and Girdhar, C. (2004), *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*, Newnes, Elsevier, 272 p.

Надійшла до редколегії 28.03.2019

Схвалена до друку 21.05.2019

Відомості про авторів:

Чепурний Юрій Васильович

начальник наукової лабораторії
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2615-1312>

Information about the authors:

Yurii Chepurnyi

Chief of Research Laboratory
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2615-1312>

Мартинець Броніслав Зеновійович
курсант
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0326-6782>

Bronislav Martinets
Cadet
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0326-6782>

МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ПРЯМОМУ СПЕКТРУ ВИБРАЦИИ

Ю.В. Чепурный, Б.З. Мартинец

В статье рассмотрены колебательные процессы узлов, генерирующих вибрации в газотурбинном двигателе (ГТД). Разработана методика выявления первоначального технического состояния узлов авиационных силовых установок (АвСУ) с помощью прямого спектра вибрации. Формализованная процедура определения технического состояния узлов и агрегатов ГТД по сопоставлению двух спектрограмм спектрального анализа сигналов вибрации, полученные с помощью узконаправленного вибропреобразователя. Методом исследования является сравнение двух спектрограмм вибросостояния узлов ГТД. С помощью узконаправленного вибропреобразователя, сравнения и анализа линейных спектров вибрации двигателя, получили диагностическую информацию о состоянии сборки (степени износа) узлов и механизмов, входящих в состав газотурбинной силовой установки.

Ключевые слова: колебания, вибрация, процедура, резонанс, спектрограмма, техническая диагностика.

METHOD DIAGNOSTICS OF THE GAS TURBINE ENGINE IN THE DIRECT SPECTRUM OF VIBRATION

Yu. Chepurnyi, B. Martinets

The article is about oscillation processes of nodes generating vibrations in aviation gas turbine installations (GTI). The engine is considered as a complex dynamic system consisting of a finite number of interconnected and interacting elements and nodes through which the transfer of fluctuations from one node to another on the body of the GTI and air vehicle (AV). The development of a detection method aviation powerplants (APP) through direct spectrum vibration of the previous state units was carried out. Formalized the procedure for determining the technical state of nodes and aggregates of the GTI by the comparison of two spectra of the spectral analysis of the vibration signals obtained with the help of narrow-angle vibration transducer. For the purposes of vibration diagnostics of aviation GTI, two types of spectrs were used: built on a linear scale and spectrs constructed on a logarithmic scale. The use of broadband spectrs constructed on a logarithmic scale which allows us to determine defects in the work of blades and kinematic pairs. The research method is to compare two spectrographs of the vibration of the GTI nodes measured at certain intervals. As a result of the comparison and analysis of the linear spectra vibration engines, we received important diagnostic information on the quality of the assembly and the degree of wearing nodes and mechanisms that are part of the gas turbine installations, as well as the diagnostic value of the spectral analysis of the vibration signals obtained with the help of a narrow-vibration transducer as a tool for obtaining a high-frequency signal. The type of engine under investigation has a broadband spectrs of frequencies on small gas up to 25 kHz and above; in cruising mode the frequency range extends to 50 kHz.

Keywords: oscillating; vibration; procedure; resonance; spectrograms; technical diagnostic.