

М.І. Суханов, Ю.В. Чепурний, О.П. Терещенко, Б.З. Мартинець

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

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ОДНОКОНТУРНИХ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ З ТОЧКИ ЗОРУ АКУСТИЧНОЇ ВІБРОДІАГНОСТИКИ

У статті розглянуті конструктивні схеми та особливості одноконтурних авіаційних газотурбінних двигунів через точки зору акустичної вібродіагностики. З метою оптимізації програми дослідження вібро-сигналу, скорочення часу вібровиміру, мінімізації витрачання ресурсу авіаційних газотурбінних двигунів та авіаційного палива розроблена методика виявлення точок виміру вібрації для з'ясування технічного стану вузлів авіаційних силових установок за допомогою вузьконаправленого віброперетворювача. Досліджений безпосередній силовий зв'язок між опорами ротора і зовнішнім корпусом двигуна.

Ключові слова: літальний апарат, вібрація двигунів, ротор, вібровимірювання, турбокомпресор.

редуктор.

Вступ

Постановка проблеми. Бортова система контролю вібрації двигунів, яка застосовується на сучасних літальних апаратах (ЛА), при всій своїй користі не задовольняє вимогам щодо отримання діагностичної інформації про стан окремих вузлів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з високим ступенем достовірності. Це пов'язано з тим, що вона працює в обмеженому частотному діапазоні і використовує в якості первинної інформації обмежене число датчиків вібрації (один або два). Бортові системи здатні відстежувати тільки значні зміни в технічному стані двигунів та іноді проміжок часу від початку зростання рівня вібрації до перевищення ним граничного рівня вкладається в кілька хвилин або навіть секунд та вимагає виключення двигуна в польоті. Це різко знижує безпеку польоту ЛА [1–9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авіаційні ГТД виконані за різними конструктивними схемами і поділяються на два великі класи: одноконтурні ГТД і двоконтурні турбореактивні двигуни (ТРДД). Одноконтурні ГТД знайшли широке застосування на вертольотах. Основною особливістю одноконтурних ГТД з точки зору акустичної вібродіагностики є те, що в них здійснено безпосередній силовий зв'язок між опорами ротора і зовнішнім корпусом двигуна. Вертолітні ГТД найчастіше виконуються за схемою однороторний ТВад (турбовальний двигун) з вільною турбіною (ТВ2-117, ТВ3-117, Д-25В) [10]. Застосовуються також двигуни з двохвальним турбокомпресором (Д-136). Наявність тільки одного контуру зумовлює високий ступінь пристосованості їх для умов акустичної вібродіагностики. Це

дозволяє проводити вимірювання практично в будь-якій точці зовнішнього корпусу двигуна в залежності від поставленого завдання [11–12].

Мета статті – аналіз конструктивних схем одноконтурних авіаційних газотурбінних двигунів з точки зору акустичної вібродіагностики.

Виклад основного матеріалу

Газотурбінні двигуни ТВ2-117 і ТВ3-117 являють собою одноконтурні двохроторні турбовальні двигуни. Перший ротор є ротором турбокомпресора та складається з осьового компресора (на ТВ2-117 компресор має 10 ступенів, на ТВ3-117 – 12 ступенів) і осьову турбіну (2 ступені). Другий ротор є ротором вільної турбіни, який передає обертаючий момент головному редуктору приводу несучого гвинта вертольота. На роторі встановлена осьова двоступенева турбіна компресора на 3 підшипниках кочення. Ротор вільної турбіни встановлений на двох підшипниках кочення. Тобто роторна частина двигунів є п'ятиопорною та містить 2 кулькових радіально-опорних підшипника (опора № 2 – задній підшипник компресора; опора № 4 – передній підшипник ротора вільної турбіни) і 3 роликів радіальних підшипника. Корпус двигунів виконаний з тонкостінних металевих оболонок, що з'єднані між собою болтовими з'єднаннями. Зовнішній корпус є силовою частиною, тому що на ньому замикаються внутрішні силові зв'язки двигуна.

На корпус передаються зусилля від усіх п'яти опор роторів. На рис. 1 представлено поздовжній розріз двигуна ТВ3-117 із зазначенням точок, що найбільш придатні для виміру сигналів вібрації [10].

Зусилля від обертання роторів передаються на корпус через підшипники. У зв'язку з цим, найбільш зручним є проведення вимірювань вібрації в точках

корпусу, що знаходяться в поясах установки підшипників опор.

Це необхідно за умови мінімізації відстані, яку

проходить від джерела коливання до точки наведеної вузьконаправленого віброреєстратора.

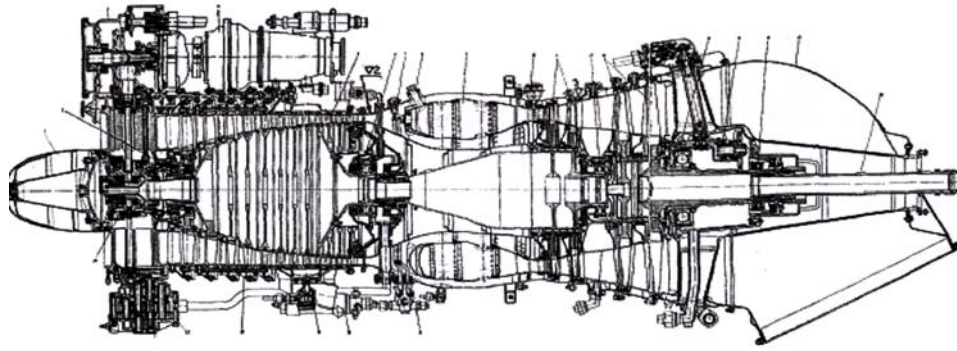


Рис. 1. Поздовжній розріз двигуна ТВ3-117 з розташуванням найбільш інформативних точок вимірювання вібрації на зовнішньому корпусі [10]

Важливою перевагою конструкції даних газотурбінних двигунів з точки зору їх пристосованості до розширеної віброакустичної діагностики в умовах наземного запуску і під час використання вузьконаправленого віброперетворювача, як джерела первинної інформації, є їхня одноконтурна схема.

При такій схемі відносно просто вирішується завдання вибору найбільш інформативних точок для виміру сигналів вібрації і мінімізується відстань, яку проходить сигнал вібрації від опор роторів до зовнішнього корпусу. Це в свою чергу знижує демпфювання високочастотної складової сигналу вібрації при поширенні по конструкції. Дана перевага (в порівнянні, наприклад, з двоконтурними двигунами) дозволяє використовувати практично повністю сучасний інструментарій цифрового спектрального аналізу вібросигналів.

Відсутність другого контуру і застосування вузьконаправленого віброперетворювача також забезпечує можливість вимірювання вібрації на всіх вузлах "гарячої" частини двигуна. Для вирішення завдання поглибленої діагностики технічного стану потрібно зробити як найбільше замірів у різних точках, що розташовані на корпусі газотурбінних двигунів. Це необхідно для комплексного обстеження відповідного вузла двигуна і "відсічення" чинників, що заважають у вигляді шумових і дискретних перешкод, які йдуть від сусідніх вузлів. Ця обставина пояснюється тим, що високочастотна вібрація локалізується в районі точки знімання інформації (в цю точку вона буде приходити тільки від сусідніх вузлів) і не може далеко поширюватися по конструкції двигуна.

З метою оптимізації програми вібровимірювань, скорочення часу вібровиміру, мінімізації витрат ресурсу ГТД і авіаційного палива обрані тільки обмежене число точок для виміру вібрації на корпусі двигуна.

Вимірювання вібросигналів проводиться в

процесі коротких запусків (тому що час одного виміру не перевищує 30 секунд) після виходу двигуна на сталий режим малого газу (визначається по стрілці покажчика тахометра турбокомпресора). Діагностування двигунів проводиться при їхньому роздільному запуску з метою виключення взаємних перешкод.

Режим малого газу є інформативним режимом для діагностики технічного стану двигунів, тому що на цьому режимі роботи мінімізуються аеродинамічні шумові перешкоди, які можуть замаскувати слабкі, але інформативні складові в сумарному сигналі вібрації, вимірюваного вузьконаправленим віброперетворювачем.

Недоліком режиму малого газу є відсутність автоматичної підтримки на даному режимі частоти обертання ротора вільної турбіни. Наявність поривчастого вітру обумовлює коливання частоти обертання вільної турбіни за рахунок змінної аеродинамічного навантаження на несучий і рульовий гвинти.

Ця обставина обумовлює необхідність до переходу на мінімальний крейсерський режим роботи, при якому забезпечується автоматичне регулювання частоти обертання несучого гвинта. Але при відсутності вітру цілком достатньо режиму малого газу.

У результаті аналізу конструктивних схем двигунів найбільш пріоритетними конструктивними елементами для вібродослідження за допомогою вузьконаправленого віброперетворювача є:

- вузол головного приводу (вузол першої опори) (точка №1);
 - вузол компресора (точка №2);
 - вузол турбіни (точка №3);
 - середній корпус головного редуктора (в районі вузла зчленування з двигуном) (точка №4).
- Точки виміру на силевій установці вертольота Мі-8Т зображено на рис. 2.

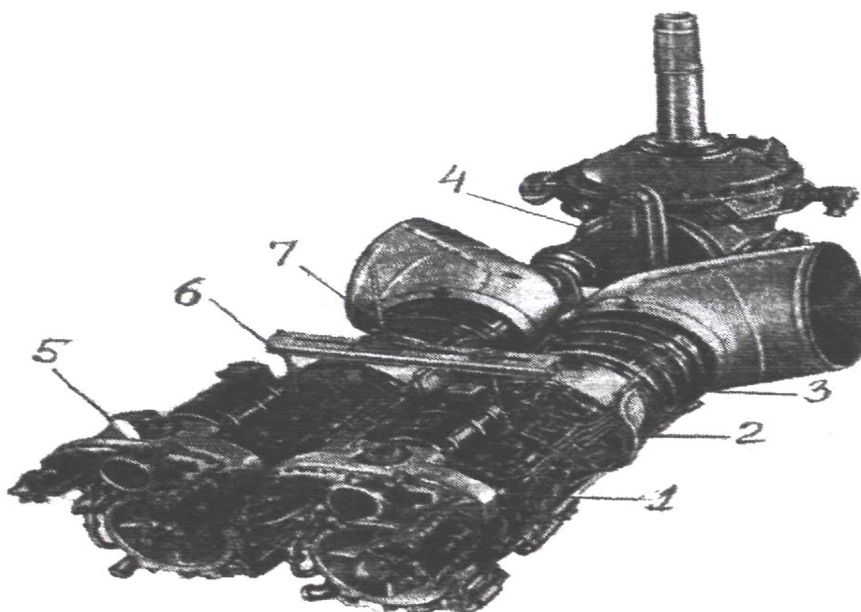


Рис. 2. Точки виміру вібрації на силовій установці вертольота Мі-8Т [10]

Для проведення вимірювань на даних вузлах ГТД необхідна наявність можливості закріплення реєстратора вібрації на відстані не більше 0,5 м від точки вимірювання вібрації. Дані обмеження пов'язані з фізичним принципом роботи вузьконаправленого віброперетворювача.

Вузол першої опори і головного приводу є досить жорсткою конструкцією, яка виконана з магнієвого сплаву. На нього передається вібрація від передньої опори ротора турбокомпресора (хоча з ослабленням за рахунок установки пружного кільця між підшипником та стаканом у корпусі), шестернею головного приводу і коробки приводів, приводних

агрегатів. Найкращим місцем для наведення віброакустичного перетворювача в точці вимірювання № 1 є нижня частина корпусу першої опори (з огляду на те, що на стороні даного сектора знаходиться зона навантаження підшипника від масових сил ротора), але з огляду на особливості установки двигунів на вертольоті вона недоступна для проведення вимірювань. Найбільш компромісною точкою для знімання сигналу вібрації на корпусі першої опори є бокова поверхня (замір в боковому напрямку), що знаходиться навпроти внутрішнього горизонтального ребра (одного з чотирьох ребер, що з'єднують зовнішній і внутрішній корпуси передньої опори) рис. 3.

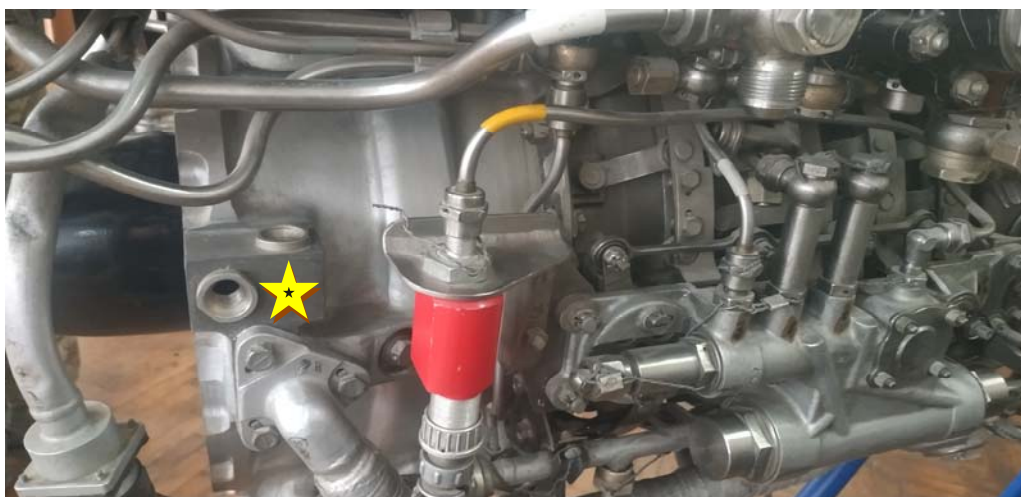


Рис. 3. Точка виміру вібрації на корпусі першої опори ГТД ТВ2-117 вертольота Мі-8

Джерело: фото виконано автором

При діагностуванні компресора постає питання визначення якості роботи лопаток вузлів, самого ротора (з точки зору дисбалансу і перекосів в його з'єднаннях) і підшипникового вузла другої опори ротора турбокомпресора.

У той же час для найбільш повної картини діагностики необхідно, щоб в точку вимірювання вібрації вузла компресора не надходила вібрація від вузла центрального приводу і приводних агрегатів, тому, що дана вібрація буде вважатися перешкодою.

Одним з основних об'єктів діагностування в точці вимірювання № 2 є радіально-упорний кульковий підшипник задньої опори компресора, який є найбільш навантаженим і відповідальним вузлом, тому що крім навантаження від масових сил ротора і гіроскопічних сил він сприймає осьове навантаження від ротора і передає її на корпус двигуна. Для отримання вібросигналу від цього підшипника (що є найбільш складним завданням з огляду на його малі розміри) необхідно, щоб шлях в конструкції двигуна від підшипника до точки вимірювання був якомога однорідніше.

Це означає мінімальну кількість сполучних вузлів і місць з перемінним перетином. Найбільш інформативним місцем для проведення вимірювань в точці № 2 є зовнішнє кільце заднього корпусу. Це пов'язано з тим, що до цього вузла безпосередньо кріпляться внутрішні силові елементи, що передають зусилля від ротора турбокомпресора через упорний підшипник на корпус двигуна. Тому вимір в точці № 2 (як показує досвід) необхідно проводити в горизонтальній площині на коробці перепуску повітря поряд з фланцем кріплення її до заднього корпусу компресора (рис. 4).



Рис. 4. Точка виміру вібрації на коробці перепуску повітря ГТД ТВ2-117 вертольота Мі-8

Джерело: фото виконано автором.

Турбіна двигуна є найбільш навантаженим його елементом, тому що крім масових, відцентрових і гіроскопічних сил на неї діють високі температурні навантаження.

Це визначає важливість вузла турбіни з точки зору об'єкта для віброакустичної діагностики.

Як згадувалося вище, турбіна двигунів ТВ2-117 і ТВ3-117 є двохвальною і складається з двоступеневої турбіни турбокомпресора і двоступеневої вільної турбіни. Турбіни не пов'язані між собою кінематично і тому обертаються з різними окружними швидкостями. При діагностиці вільної турбіни на режимі малого газу двигуна є одна особливість: значення частотного спектра можуть бути дещо розмитими (в порівнянні з аналогічними дискретними складовими для турбіни турбокомпресора) [10]. Це пов'язано з тим, що на режимі малого газу двигун знаходиться під контролем регулятора обертів агрегату НР-40ВР (НР-ЗВМ на ТВ3-117), який підтримує тільки частоту обертання ротора турбокомпресора.

Обороти вільної турбіни можуть змінюватися в досить широких межах в результаті зміни аеродинамічного навантаження на несучий гвинт. Але як показала практика, таке коливання в оборотах (насправді воно, як правило, набагато менше) дозволяє використовувати режим малого газу для діагностики вільної турбіни.

На двигуні ТВ2-117 можливо провести тільки інтегральний аналіз технічного стану вузла турбіни. Це пов'язано з тим, що вимір можна зробити тільки на корпусі третьої опори (рис. 5), а вимір на зовнішньому кільці корпусу четвертої і п'ятої опор зробити не можна через зовнішній кожух. Але з огляду на невеликі габарити двигуна цього виміру достатньо, тому що вібрація від вільної турбіни доходить до даної точки вимірювання.

На двигуні ТВ3-117 є можливість диференціальної діагностики вільної турбіни шляхом введення додаткової точки вимірювання № 4 на корпусі дифузора вихлопного пристрою.



Рис. 5. Точка виміру вібрації на корпусі третьої опори ГТД ТВ2-117 вертольота Мі-8

Джерело: фото виконано автором.

Вибір точки вимірювання, розташованої на головному редукторі ВР-8А (ВР-14) обумовлений необхідністю інтегральної оцінки його технічного стану, виявлення резонансних коливань і визначення

точності центрування зчленування двигуна і редуктора.

На рис. 6 показано розташування точки виміру вібрації на редукторі ВР-8А вертольота Мі-8Т.



Рис. 6. Точка виміру вібрації на головному редукторі ВР-8А

Джерело: фото виконано автором.

Висновки

За допомогою аналізу конструктивної схеми одноконтурного авіаційного газотурбінного двигуна були визначені найбільш інформативні, з точки зору акустичної вібродіагностики, точки вимірювання амплітудно-частотних характеристик вузлів двигуна.

На відміну від існуючих засобів бортової віб-

родіагностики, відображають його реальний технічний стан в будь-якій точці зовнішнього корпусу та навісних агрегатів.

Можливість проведення вимірювань безпосередньо на корпусі діагностованих вузлів газотурбінного двигуна значно підвищує чутливість вібраційного контролю.

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. – М.: 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. Rakheja S. Vibration and shock hand / S. Rakheja. – London: Taylor&Francis Group, 2005. – 122 с.
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, Lennynhrad, 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 vmashinakh" [*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., Arbuзов, S.M. and Soloveva, E.B. (2005), "Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov" [*The Basics of Digital Signal Processing*], BKhV, Saint 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. Rakheja, S. (2005), *Vibration and shock hand*, Taylor&Francis Group, London, 122 p.
12. Scheffer, C. and Girdhar, C. (2004), *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*, Newnes, Elsevier, 272 p.

Надійшла до редколегії 02.10.2019

Схвалена до друку 19.11.2019

Відомості про авторів:

Суханов Михайло Ігорович

завідувач кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3029-7111>

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:

Mykhailo Sukhanov

Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3029-7111>

Yurii Chepurnyi

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

Терещенко Олексій Павлович

викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5790-740X>

Oleksii Tereshchenko

Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5790-740X>

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>

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ОДНОКОНТУРНЫХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИНЫХ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

М.И. Суханов, Ю.В. Чепурной, А.П. Терещенко, Б.З. Мартинец

В статье рассмотрены конструктивные схемы и особенности одноконтурных авиационных газотурбинных двигателей с точки зрения акустической вибродиагностики. С целью оптимизации времени программы исследования вибросигнала, сокращения времени виброизмерения, минимизации использованного ресурса газотурбинного двигателя и авиационного топлива разработана методика выявления точек измерения вибрации для выяснения технического состояния узлов авиационных силовых установок с помощью узконаправленного вибропреобразователя. Исследована непосредственная силовая связь между опорами ротора и внешним корпусом двигателя.

Ключевые слова: летательный аппарат, вибрация двигателей, ротор, виброизмерение, турбокомпрессор, редуктор.

ANALYSIS OF DESIGN CIRCUITS OF SINGLE-CIRCUIT AVIATION GAS TURBINE ENGINES FROM THE POINT OF VIEW OF ACOUSTIC VIBRATION DIAGNOSTICS

M. Sukhanov, Yu. Chepurniy, O. Tereshchenko, B. Martinets

The article describes design schemes and features of single-circuit aircraft gas turbine engines from the point of view of acoustic vibration diagnostics. It was noted their advantages in comparison with double-circuit gas turbine engines. Under this scheme, the problem of choosing the most informative points for measuring vibration signals from rotor supports to the outer casing is relatively simple to solve. To solve the problem of a more detailed diagnosis of the technical condition, it is necessary to make as many measurements as possible at different points on the aircraft gas turbine engines housing. A brief analysis and evaluation of modern diagnostic information systems that work in a limited frequency range and use a limited number of vibration sensors (one or two) as primary information is given. The inability of these systems to track defects in components and assemblies at the initial stage of their development. In order to optimize the program for obtaining vibration information, vibration measurement time, and minimizing the resource consumption of a gas turbine engines and aviation fuel, a methodology has been developed for identifying vibration measurement points to determine the technical condition of aircraft power units using a narrowly directed vibration transducer. The direct power connection between the rotor bearings and the outer casing of the TV2-117 and TV3-117 engines installed on the Mil MI-8T helicopter was investigated. The key points for obtaining vibration information on these gas turbine engines are determined, taking into account the presence of a free turbine, using a narrowly directed vibration transducer: on the main drive assembly, compressor, turbine, and gearbox. The vibrations parameters are often used as a health indicators for aircraft gas turbine engines. That is why the most obvious way to prevent any damages of engine structure is to provide a spectral analysis. The best way of developing this method will be implementing in complex diagnostic system that will indicate further behavior of engine structures.

Keywords: aircraft, engine vibration, rotor, vibration measurement, turbocharger, gearbox.