

Ю.В. Чепурний, Б.З. Мартинець

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

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ РЕЗОНАНСІВ У РОБОТІ АВІАЦІЙНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ КАСКАДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

*Приводяться основні положення методу виявлення резонансів авіаційних силових установок (АвСУ) за допомогою каскадного спектрального аналізу. Формулюються етапи роботи запропонованого методу при визначенні особистих частот коливання корпусних елементів досліджуваних двигунів, відстеження за змінами критичних частот обертання роторів АвСУ на етапі зборки і ремонту за допомогою аналізу каскадного спектру вібрацій вузлів АвСУ. Пропонується для обробки вібросигналу та для зменшення часових витрат використовувати синхронний реєстратор Атлант (ПВФ Вібро-Центр). Результати дослідження можуть бути використані при переході авіаційної техніки на експлуатацію за технічним станом.*

**Ключові слова:** спектральний, експлуатація, метод, резонанс, сигнал, вібрація, двигун.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Авіаційна газотурбінна силова установка являє собою систему конструктивних елементів, що мають різні пружно-масові характеристики. Під пружно-масовими характеристиками розуміються характеристики маси і жорсткості елементів, що входять в систему.

В процесі роботи двигуна кожен елемент знаходиться в коливальному русі через взаємовплив один на одного елементів, що утворюють ГТД.

Коливання відбуваються внаслідок наявності так званих “активних” компонентів двигуна, тобто тих вузлів, які генерують вібрацію (вузли, що забезпечують робочий процес ГТД). До таких вузлів відносяться ротори, лопаткові апарати, що обертаються, агрегати, які також можуть містити потокостворючі елементи, які в свою чергу є генераторами вібрацій.

Елементи, що входять до ГТД знаходяться в складному коливальному русі, зумовленому вимушеними і власними коливаннями. Як правило, частоти вимушених і власних коливань відрізняються один від одного в рази або в десятки разів.

Сучасна бортова система контролю вібрації двигунів при всій своїй користі не задовольняє вимогам щодо отримання діагностичної інформації про стан окремих вузлів 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

один політ, що вимагає виключення двигуна в польоті. Це різко знижує безпеку польоту повітряних суден (ПС).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливості застосування аналізу вібросигналу на сьогодні достатньо повно розкриті в низці наукових робіт [1–12]. Це пов'язано з тим, що під час збіжності частот вимушених та власних коливань в коливальній системі виникає резонанс, при якому дуже зростає амплітуда коливань та вібраційне навантаження. Такий ріст динамічних навантажень є небезпечним, у зв'язку з великою ймовірністю руйнування конструкції.

Істотний вклад у розвиток методології застосування алгоритмів діагностики технічного стану машин та механізмів будь якого призначення на підставі даних вібрації внесли Сидоренко М.К., Карасьов В.А., Балицький Ф.Я., Соколова А.Г., Барков А.В., Баркова Н.А., Ушаков А.П.

**Метою статті** є розробка методу виявлення резонансів в роботі АвСУ за допомогою каскадного спектрального аналізу.

### Виклад основного матеріалу

Ймовірність виникнення резонансу конструкції при роботі ГТД знижується в процесі попередніх розрахунків при проектуванні двигуна і силової установки в цілому. Коефіцієнт запасу по резонансу, закладений при проектуванні двигуна, покликаний гарантувати відсутність резонансних коливань в процесі його роботи.

Однак, беручи до уваги значну кількість вузлів і агрегатів, що входять до складу сучасної газотурбінної силової установки, дуже важко забезпечити відстройку від резонансів по всіх каналах передачі вібрації. Під каналом передачі вібрації тут мається

на увазі система, що складається з джерела вимушених коливань (який також володіє і своєю власною частотою коливань), шляхи передачі вібрації (мається на увазі корпусні деталі) і власне сам приймач коливань, в ролі якого можуть виступати різні агрегати і конструктивні елементи.

Корпусні елементи також можна розглядати в якості приймача коливань, збуджуючим джерелом вимушеної сили. В процесі роботи ГТД корпусні деталі знаходяться в складному коливальному русі з утворенням різних за складом вібрації зон. Це пов'язано з тим, що корпусні деталі коливаються на вимушених частотах і на власних частотах.

Виникнення багатозонного вібраційного поля на зовнішньому корпусі ГТД обумовлено різним загасанням вібрації, що генерується "активними" елементами при поширенні її до зовнішнього корпусу. В результаті цього, при вимірюванні вібрації в різних точках зовнішнього корпусу спостерігається різний спектральний склад сигналу вібрації (під відмінностями складу розуміється відмінність в рівнях складових вібрації і в самих частотних компонентах спектру).

Беручи до уваги все різноманіття каналів передачі сигналів і відповідної йому безлічі власних частот даних каналів, можна зробити висновок про неможливість проведення точних попередніх розрахунків на резонансні коливання всіх елементів, які входять в силову установку ПС. Крім того, з ростом напрацювання пружно-масові характеристики системи ГТД безперервно змінюються, а отже, змінюються і власні частоти каналів передачі вібрації і окремих конструктивних елементів, що входять до складу ГТД. Наприклад, це може бути пов'язано з циклічною зміною навантажень в процесі роботи, зносом підшипників опор, що викликає зниження їх жорсткості, усадкою гумово демпферів в вузлах навішування двигуна.

Процеси зносу, втомленого руйнування і старіння яке викликає зміну власних частот коливань елементів, що призводить до можливої появи резонансних коливань в процесі роботи двигуна. Такі резонансні коливання часто залишаються непоміченими бортовою системою контролю вібрації на увазі віддаленості розташування віброперетворювачів від джерела коливань.

У зв'язку з цим бачиться перспективним застосування вузьконаправленого мікрофона для діагностування виникнення резонансних коливань у вузлах конструкції ГТД. Це пов'язано з можливістю оперативного обстеження великої кількості точок на корпусі двигуна та його агрегатів в процесі наземного запуску ГТД.

У світлі рішення даного завдання також бачиться перспективним застосування вузьконаправ-

леного мікрофона для визначення власних частот коливання корпусних елементів.

У процесі експериментальних досліджень авторами були поставлені досліди по визначенню власних частот коливань корпусних елементів досліджуваних двигунів. Це було зроблено з метою визначення причин зростання шумових компонентів спектра вібрації в області середніх і високих частот. Для вимірювання власних частот корпусних деталей спочатку записувався сигнал вібрації корпусу, що генерується ударами імпедансного молотка, а потім проводився порядковий аналіз періодів коливань системи з метою визначення власної частоти коливань.

На рис. 1 представлений сигнал вібрації корпусу передньої коробки приводів (ПКП) ТРДД Д-ЗОКУ-154. Даний сигнал відображає затухаючі коливання корпусу ПКП.

Для порівняння на рис. 2 представлений сигнал затухаючого коливання генератора ГТ-40ПЧ6. З порівняння видно, що коливальна система корпусу генератора має значно більшу добротність. З тимчасового аналізу періодів загасаючих коливань слід, що власна частота коливань корпусу ПКП становила 4100 Гц, а власна частота коливань генератора – 1000 Гц. Наявність власної частоти коливань корпусу призводить до того, що спектр сигналу в даній частотній області змінюється. Зміна спектра складається в наявності підйому шумових складових в даній частотній області.

Автори не випадково згадали шумові складові, тому що частотний діапазон власних коливань є не дискретне коливання, а сукупність коливань, частоти яких знаходяться в деякому діапазоні, симетричному щодо центральної частоти, що визначає середню частоту власних коливань досліджуваної ділянки корпусу.

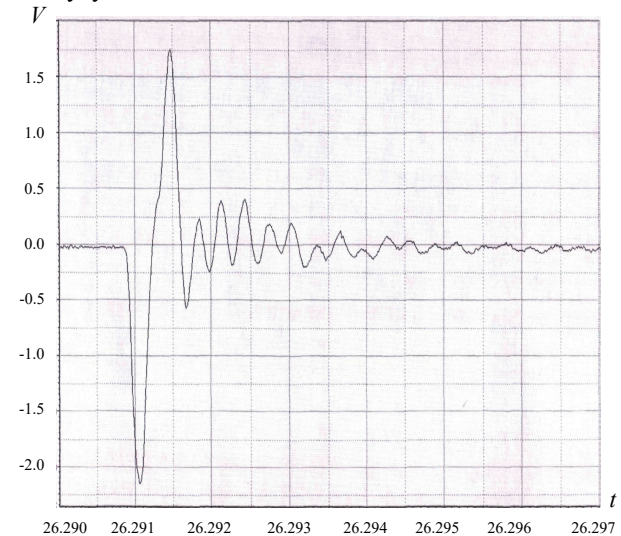


Рис. 1. Визначення частоти власних коливань корпусу ПКП ТРДД Д-ЗОКУ-154

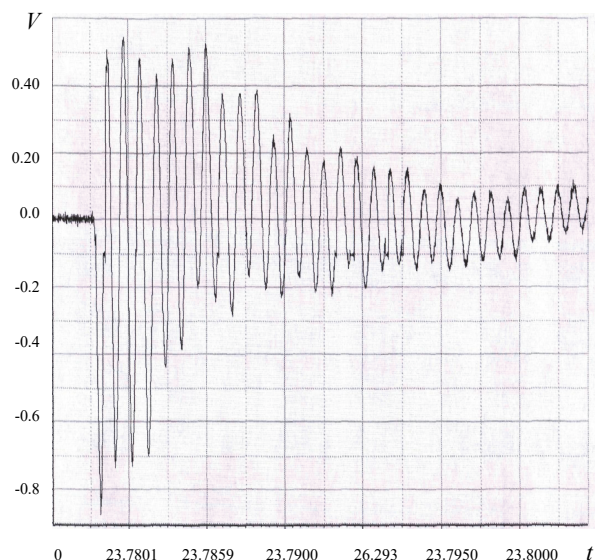


Рис. 2. Визначення частоти власних коливань корпусу генератора ГТ-40ПЧ6 ТРДЦ Д-ЗОКУ-154

Взаємодія частотних складових області власних коливань з дискретними складовими, що генеруються іншими джерелами коливань призводить до спотворення їх величини (як - правило, до збільшення амплітуди коливань). Для прикладу на рис. 3 представлено ділянку височастотного спектра вібрації, що показує зону власних коливань корпусу ПКП. На спектрі видно характерний підйом фонові компоненти в діапазоні частот 3800 Гц - 4800 Гц. Це пояснюється широким частотним діапазоном власних коливань ділянки корпусу ПКП, на якій відбувалося вимір.

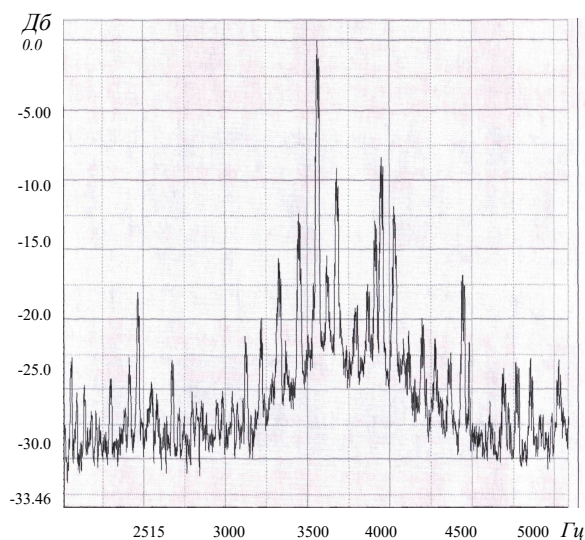


Рис. 3. Приклад впливу області власних частот коливання корпусу на спектр вібрації ПКП

Дослідним шляхом було встановлено, що ширина діапазону власних частот коливань в спектрі залежить від кількості неоднорідностей на корпусі дослідженого об'єкта. Такими неоднорідностями

можуть бути припливи, бобишки, гнізда підшипників і т.д. Чим більше неоднорідностей на ділянці корпусу, де проводиться вимір вібрації, тим більше власних частот, буде генеруватися в даній точці і тим ширше буде частотний діапазон власних коливань в спектрі вібрації.

Крім власних частот коливань, джерелом резонансних явищ можуть бути обертаючі елементи. Сучасний ГТД містить значну кількість обертових валів (включаючи вали приводних агрегатів), які обертаються з різними кутовими швидкостями.

Основним джерелом подібних вібрацій є ротори двигунів.

Ротори є конструкцією, що працює в закритичній області частот обертання. Критичні обороти є прохідними на етапі запуску. У зв'язку з цим однією з можливих завдань акустичної вібродіагностики є завдання відстеження за зміною критичних частот обертання роторів ГТД на етапі запуску. Це може бути перспективним при дослідному доведенні двигунів, або при приймально-здавальних випробуваннях після зборки або ремонту.

На рис. 4 показаний каскадний спектр вібрації задньої опори ТРДД Д-ЗОКУ-154, який вимірюється на етапі запуску синхронним реєстратором Атлант (ПВФ Вібро-Центр). На спектрі видно процес проходження критичної частоти коливань ротора високого тиску, що супроводжується різким зростанням амплітуди віброшвидкості гармоніки частоти обертання. За допомогою спектра також легко визначити і критичну частоту коливань, яка в даному випадку становить 62 Гц (3720 об / хв).

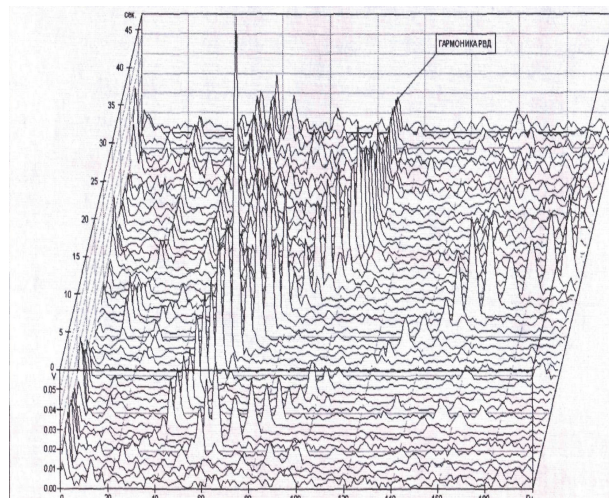


Рис. 4. Каскадний спектр процесу запуску, вимірююмого на задні опорі ТРДД Д-ЗОКУ-154 показаний процес проходження резонансу ротором високого тиску

В процесі проведення досліджень резонансних явищ, було встановлено експериментально, що склад ротора при розгоні проходить резонансні час-

тоти коливань окремих роторів, що входять до його складу. На попередньому графіку був показаний каскадний спектр вібрації, який вимірюється в процесі запуску на зовнішній обичайці задньої опори ТРДД Д-30Ку-154. Отже, даний спектр найбільш повно відображає поведінку ротора турбіни високого тиску. Це пов'язано з тим, що жорсткість опор окремих валів, що утворюють ротор, різна. Критична ж частота залежить не тільки від параметрів ротора, а й від параметрів його опор. Тому на практиці спостерігаються різні критичні частоти при вимірюванні вібрації в різних точках.

Крім того, наявність декількох критичних частот (наприклад, критична частота ротора турбіни, критична частота ротора компресора) призводить до передачі коливальної енергії від ротора компресора до ротора турбіни і навпаки. Коефіцієнт передачі залежить від властивостей демпфірування в вузлах з'єднання роторів.

Якщо розглядати конструктивні особливості ротора каскаду високого тиску ТРДД Д-30Ку-154, то можна зробити припущення про значні сили демпфірування в вузлі з'єднання роторів. Це пов'язано з конструкцією самого вузла, що представляє собою складну шлицеву муфту з великою кількістю поверхонь тертя.

Дане припущення було підтверджено практично під час проведення вимірювань вібрації на різних вузлах двигуна на етапі запуску. Наприклад, на рис. 5 представлений каскадний спектр вібрації ТРДД Д-30Ку-154, який вимірюється на задній коробці приводів (ЗКП). З спектра видно, що ротор має критичну частоту 80 Гц (4800 об / хв), а не 62 Гц. Це пояснюється домінуючим впливом ротора компресора високого тиску (КВТ) в силу того, що в поясі підвіски ЗКП розташована його задня опора.

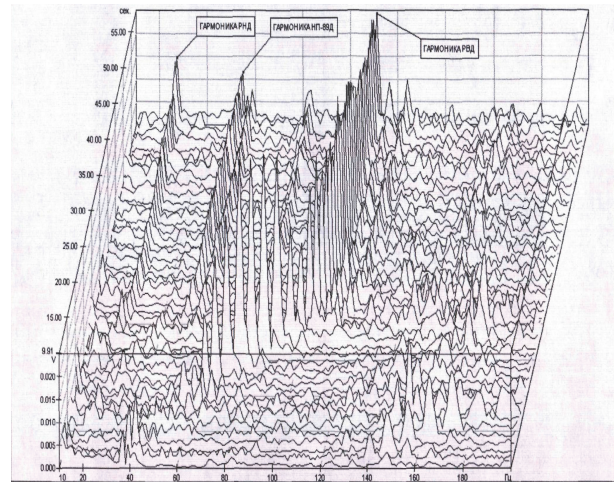


Рис. 5. Каскадний спектр вібрації ПКП з резонансом ротора КВТ

## Висновки

У статті запропонований метод виявлення резонансів у роботі АвСУ за допомогою каскадного спектрального аналізу, який на відміну від існуючих, відображає реальну ситуацію змін критичних частот обертання роторів ГТД на етапі зборки і ремонту. В ході дослідження отримано значення вібросигналу корпусу передньої коробки приводів (ПКМ) ТРДД-30КУ 154 і сигнал вібрації генератора ГТ-40ПЧ6, що дозволяє провести аналіз за допомогою двохвимірної діаграми коливань та визначити, що більшою добротністю володіє коливальна система корпусу генератора ГТ-4-ПЧ. Також за допомогою каскадного спектрального аналізу можливо визначити резонансну частоту, яка являється критичною частотою, та зможе призвести до руйнування окремих складових двигуна і силової установки в цілому.

## Список літератури

1. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А.А. Александров, А.В. Барков, Н.А. Баркова, В.А. Шафранский. – Л.: Судостроение, 1986. – 276 с.
2. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
3. Башта Т.М. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
4. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
6. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.
7. Карасёв В.А. Доводка эксплуатируемых машин. Виброакустические методы / В.А. Карасёв, А.Б. Ройтман. – М.: Машиностроение, 1986. – 189 с.
8. Коллакот Р.А. Диагностика повреждений / Р.А. Коллакот. – М.: Мир, 1989. – 516 с.
9. Максимов В.П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В.П. Максимов, И.В. Егоров, В.А. Карасёв. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
10. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций / А.С. Никифоров. – Л.: Судостроение, 1990. – 200 с.
11. Основы цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьёва. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.
12. Ушаков А.П. Основы теории технической диагностики / А.П. Ушаков. – СПб.: СПбГАГА, 2003. – 42 с.

## References

1. Aleksandrov, A.A., Barkov, A.V., Barkova, N.A. and Shafranskii, V.A. (1986), “*Vibratsiya i vibrodiagnostika sudovogo elektrooborudovaniya*” [Vibration and vibration diagnostics of ship electrical equipment], Sudostroenie, Leningrad, 276 p.
2. Balitskii, F.Y., Ivanova, M.A., Sokolova, A.G. and Khomyakov, E.I. (1984), “*Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikh defektov*” [Vibroacoustic diagnostics of incipient defects], Nauka, Moscow, 120 p.
3. Bashta, T.M. (1989), “*Tekhnicheskaya diagnostika gidravlicheskikh privodov*” [Technical diagnostics of hydraulic drives], Mashinostroenie, Moscow, 263 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. Goldin, A.S. (1999), “*Vibratsiya rotornykh mashin*” [Vibration rotary machines], Mashinostroenie, Moscow, 344 p.
6. 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.
7. Karasev, V.A. and Roitman, A.B. (1986), “*Dovodka ekspluatiruemykh mashin. Vibroakusticheskie metody*” [Finishing of the operated machines. Vibroacoustic methods], Mashinostroenie, Moscow, 189 p.
8. Kollakot, R.A. (1989), “*Diagnostika povrezhdenii*” [Damage Diagnosis], Mir, 516 p.
9. 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, Moscow, 208 p.
10. Nikiforov, A.S. (1990), “*Akusticheskoe proektirovanie sudovykh konstruksii*” [Acoustic design of ship structures], Sudostroenie, Leningrad, 200 p.
11. Solonina, A.I., Ulakhovich, D.A., Arbutov, S.M. and Solov'eva, E.B. (2005), “*Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov*” [The Basics of Digital Signal Processing], BKhV–Peterburg, St. Petersburg, 768 p.
12. Ushakov, A.P. (2003), “*Osnovy teorii tekhnicheskoi diagnostiki*” [Fundamentals of the theory of technical diagnostics], SPbAGA, St. Petersburg, 42 p.

Надійшла до редколегії 24.02.2019

Схвалена до друку 5.03.2019

**Відомості про авторів:****Чепурний Юрій Васильович**

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

**Мартинець Броніслав Зіновійович**

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

**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>

**Bronislav Martinets**

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

### МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ В РАБОТЕ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАСКАДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Ю.В. Чепурный, Б.З. Мартинец

Приводятся основные положения метода выявления резонансов авиационных силовых установок (АвСУ) с помощью каскадного спектрального анализа. Формулируются этапы работы предложенного метода при определении личных частот колебания корпусных элементов исследуемых двигателей, отслеживание за изменениями критических частот вращения роторов АвСУ на этапе сборки и ремонта с помощью анализа каскадного спектра вибраций узлов АвСУ. Предлагается для обработки вибрации и для уменьшения временных затрат использовать синхронный регистратор Атлант (ПВФ Вибро-Центр). Результаты исследования могут быть использованы при переходе авиационной техники на эксплуатацию по техническому состоянию.

**Ключевые слова:** спектрального, эксплуатацию, метода, резонансную, сигнала, вибраций, двигателей.

---

**THE METHOD OF DETECTING RESONANCES IN AIRCRAFT AUXILIARY UNIT OPERATION  
USING THREE-DIMENSIONAL SPECTRAL ANALYSIS**

Yu. Chepurniy, B. Martinets

*The subject of the study is oscillatory process of nodes generating vibrations in aircraft gas turbine installations (GTI). The aim of the paper is to develop a method for detecting resonant frequencies in the nodes in aircraft auxiliary power installation (AAP) using three-dimensional spectral analysis. The object of the paper is to formalize the determination procedure of oscillation natural frequencies of packaged component under the study; to track changes in critical frequencies of GTI rotors pitching at the stage of assy and fix using the three-dimensional vibration spectrum of GTI nodes analyze. As the method is used a new model of three-dimensional spectrum analysis to diagnose aircraft engines using the Atlanta synchronous recorder ( PVF Vibro-Center). As a result we obtained the front box of the drives (FBD) TRDD-30KU 154 house vibration signal data and GT-40 PCH6 generator vibration (oscillation); using a two-dimensional vibration pattern analyzed and determined the frequency characteristics of the GT-40 PCH6 generator case; using a three-dimensional spectral analysis we determined the critical resonant frequency that could lead to the distraction of individual engine components (parts, assembly, units, etc.) and the auxiliary power as a whole. The scientific novelty of the results obtained is as follows: in the perspective of using a non-contact narrowly directed vibration analyzer to determine the oscillation natural frequencies of the hull elements of the auxiliary power(AP); using the method of three-dimensional spectral analysis of the vibration signal processing we could determine the resonant frequencies of certain components of the engine and auxiliary power installation in the conditions of transient modes of engine operation. The results of experimental work using a non-contact narrow-directional vibration recorder (vibration analyzer) showed that successful measurement procedures (with minimum measurement time to save fuel and analyze the vibration signal) require portable digital devices with a high sampling rate of input analog signals from the vibration recorder , computer software, which will allow to carry out the whole complex of works with digital signals.*

**Keywords:** spectral, diagnostics, methods, resonant, signal, vibration, engine.