

УДК 629.735.45:621.833(031)

В.Н. ЖУРАВЛЕВ¹, А.В. ПАПЧЕНКОВ², С.А. БОРЗОВ¹¹ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», ²ОАО «Мотор Сич»

МЕТОДИЧЕСКАЯ АДЕКВАТНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РОТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ РЕДУКТОРОВ ГТД

Рассматривается задача, суть которой состоит в анализе адекватности спектральной математической модели при техническом диагностировании состояния роторных деталей редукторов газотурбинных двигателей. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод о нестационарности вибросигналов ГТД и поставлен под сомнение факт полной информационной адекватности метода гармонического анализа. Экспериментально доказано, что функции спектральной плотности мощности и спектра амплитуд вибросигнала роторных деталей редуктора отличаются на всех режимах работы двигателя.

Ключевые слова: техническая диагностика, спектральная математическая модель, роторные детали ГТД.

Постановка задачи

В основе спектральной математической модели вибросигналов (ВС) роторных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) лежит метод обратимых преобразований по системе ортогональных функций. Главное достоинство таких преобразований состоит в том, что они позволяют представить анализируемый сигнал $s(t)$ в виде конечной суммы k независимых, *детерминированных* на интервале времени анализа T_a , составляющих $s(t) = \sum_k A_k \psi_k(t)$. При этом, применительно к роторным деталям редукторов ГТД, традиционная физическая модель предполагает, что синтез каждой составляющей $A_k \psi_k(t)$ выполняет деталь с постоянной частотой вращения на интервале времени анализа T_a . Частоты вращения и их допустимые отклонения заданы параметрами системы управления ГТД и режимом его работы.

За многие годы был накоплен значительный научный и экспериментальный материал, разработаны и внедрены соответствующие методы и программно-аппаратные средства технического диагностирования, эффективность которых подтверждается годами их активной эксплуатации. Тем не менее, по-видимому, именно двигателестроение явилось отраслью, в которой специалисты столкнулись с фактом исчерпания возможностей общепринятой спектральной модели для диагностирования многих дефектов

деталей. Развитие дефектов происходило без обнаружения каких-либо значимых изменений в составляющих $A_k \psi_k(t)$ амплитудного спектра во всем штатном и расширенном частотных диапазонах.

Вышесказанное определяет актуальность научно-технической задачи исследования методических источников погрешностей спектральной модели путем анализа адекватности модели параметрам физического процесса излучения энергии вибраций роторными деталями редукторов ГТД. Результаты исследований позволят определить источники информационной погрешности метода и пути их минимизации.

Основная часть

Предполагая на данном этапе исследований идеальную работу системы управления ГТД в части обеспечения постоянства частот вращения ω роторных деталей на интервале времени анализа T_a , проведем анализ методической адекватности спектральной математической модели параметрам сигнала физического процесса генерации информационных составляющих вибросигналов зубчатых пар редуктора ГТД.

Идея спектральной модели. В существе спектрального подхода можно выделить две основные идеи: синтеза и анализа информационной и идентификационной (по отношению к роторной детали) составляющих ВС. Под спектральным синтезом ВС традиционно понимается процесс информационного генерирования роторными деталями детерминированных ортогональных составляющих $A_k \psi_k(t)$ с их

пространственным суммированием по длине волновода корпуса двигателя. Количество k ортогональных составляющих и значения их весовых коэффициентов A_k аутентифицируют информационную и идентификационную составляющие ВС. Под спектральным анализом, соответственно, понимается процесс информационного разложения сигнала $s(t)$ на ортогональные составляющие $s(t) = A_k \psi_k(t)$ с их последующей информационной обработкой в системе технической диагностики.

Учитывая требования и ограничения, предъявляемые спектральными методами к параметрам функции ВС $s(t)$, проведем теоретический и экспериментальный анализ адекватности методики обработки параметрам физического процесса синтеза ВС.

Теоретический анализ. Наибольшее применение в спектральном анализе получила система базисных комплексных экспоненциальных функций [1]. Традиционно утверждается, что при известных выражениях базисных функций $\psi_k(t) = \exp(-j\omega t)$ сигнал $s(t)$ однозначно определяется совокупностью коэффициентов A_k и может быть *абсолютно точно* восстановлен по этим коэффициентам. Таким образом, любая функция гильбертова пространства может быть представлена в виде комплексного ряда Фурье, который лежит в основе спектральной модели ВС.

При практических применениях ряд Фурье ограничивается определенным количеством членов k . Ограничение числа членов ряда означает аппроксимацию бесконечномерного сигнала k – мерной системой базисных функций, определяющих амплитудный и фазовый спектр сигнала с определенной *методической* погрешностью в зависимости от количества членов разложения k . Ограничение интервала анализа $t \in [Ta]$, которое определяет погрешность анализа частоты, приводит к дополнительным (в сумме с вышеуказанной) погрешностям, которые влияют на *информационную* адекватность. Кроме того, тригонометрические (и связанные с ними комплексно-экспоненциальные) функции являются собственными (детерминированными на интервале интегрирования Ta) функциями и поэтому пригодны для исследования информационных характеристик и параметров сигналов, у которых изменения параметров во времени отсутствуют. В противном случае на практике получают осредненные на интервале анализа значения коэффициентов A_k .

С позиций анализа ВС в частотной области и точного восстановления его после преобразований можно отметить *недостатки разложения сигналов в ряды Фурье*, отметим основные из них.

1. Ограниченная информативность анализа на несогласованных с сигналом временных интервалах и практически полное отсутствие возможностей анализа параметров особенностей сигналов (сингулярностей), т.к. в частотной области происходит «размытие» особенностей сигналов (разрывов, ступенек, пиков и т.п.) как по окну анализа, так и по всему частотному диапазону спектра. Так, например, преобразование Фурье не различает сигнал с суммой двух синусоид (стационарный сигнал) от сигнала с двумя последовательно следующими синусоидами с теми же частотами (нестационарный сигнал), т.к. спектральные коэффициенты A_k вычисляются интегрированием по всему интервалу Ta анализа сигнала, т.е. идентифицируют качественный спектральный состав. Преобразование Фурье в принципе не имеет возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени.

2. Детерминированные тригонометрические собственные базисные функции разложения не способны в принципе отображать перепады сигналов с бесконечной крутизной изменения параметра, т.к. для этого требуется бесконечно большое число членов ряда. При ограничении числа членов ряда Фурье в окрестностях скачков и разрывов восстановленного сигнала возникают осцилляции (эффект Гиббса).

Примером квазистационарного может быть процесс передачи крутящего момента при смене работающих зубьев пары шестерен. При смене длины контактных линий, скорости в зацеплении, скорости перемещения точек контакта и т.п. физическая модель может содержать разрыв первой производной ВС [2].

Как видно из вышеизложенного, адекватность спектрального метода анализа ВС физической модели излучения энергии вибраций **полностью определяется параметром детерминированности сигнала $s(t)$ на анализируемых временных интервалах**. Для квантованного по величине и дискретного во времени ВС $s(t, \Delta t)$, в общем случае случайного процесса, требование детерминированности полностью соответствует требованию стационарности [3].

Экспериментальные исследования. В последующих экспериментальных исследованиях будем определять основные характеристики и параметры стационарности сигнала $s(t, \Delta t)$ как дискретного случайного процесса (СП),

т.е. представим ВС в виде числового ряда, отражающего значения функции $s(t)$ через детерминированные дискретные интервалы времени $\Delta t \ll T_a$, определяемые частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Строгое определение стационарности случайного процесса подразумевает неизменность функции распределения плотности вероятностей (ФРПВ) его значений

$w_{p_n}[s(t, \Delta t)]$, $t \in (\Delta t)$, $t \in (T_a)$ произвольного порядка n на любых временных интервалах его реализаций $t \in [T_p]$, в частном случае одномерная

$w_{p_1}[s(t)]$ ФРПВ:

$$w_{p_1}[s(t, \Delta t)] = \frac{\partial F[s(t, \Delta t)]}{\partial s(t, \Delta t)}, \quad (1)$$

где $F[s(t, \Delta t)] = P[s(t, \Delta t) < x]$ – интегральная функция распределения. Независимость ФРПВ определяет постоянство моментов этих реализаций: среднего, дисперсии, асимметрии и эксцесса как необходимых, но недостаточных условий стационарности. Менее строго (в широком смысле по А.Я. Хинчину [3]) стационарность характеризует неизменность автокорреляционных функций:

$$R_{ss}(t, \Delta t, \tau) = \int_0^{T_a} [s(t, \Delta t), s(t, \tau)] d\tau, \tau \in (T_a). \quad (2)$$

Корреляционная теория определяет интервал стационарности как время корреляции АКФ τ_0 , который рассчитывается [4] как половина ширины основания прямоугольника единичной высоты, площадь которого равна площади под графиком АКФ:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \int_0^{T_a} R_{ss}(t, \Delta t, \tau) d\tau \Big|_{R_{ss} > 0}, \quad (3)$$

Таким образом, аргументированным требованием, ограничивающим (но не исключающим) применение спектральных методов как инструмента параметрического информационного анализа, является строгое требование стационарности функции сигнала $s(t)$ на исследуемых временных интервалах T_a , которые анализируются на определенных режимах работы двигателя. Координатная разрешающая способность оконного преобразования определяется интервалом времени T_a и обратно пропорциональна частотной $\Delta \omega$ разрешающей способности. При интервале времени,

равном T_a , частотная разрешающая способность определяется значением $\Delta \omega = \frac{2\pi}{T_a}$. Для оконного преобразования Фурье вышеперечисленные требования и ограничения являются принципиальными. Разрешающая способность локализации определяется принципом неопределенности Гейзенберга – невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала, то есть нельзя определить для какого-то момента времени, какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале. Чем уже окно, тем лучше временное разрешение, но хуже частотное, и наоборот. Кроме того, чем уже окно, тем более строгими становятся наши предположения о стационарности сигнала в пределах окна.

Результаты экспериментальных исследований

В качестве объекта исследований был определен редуктор двигателя АИ-450-МС, который предназначен для привода электрического генератора собственных нужд самолета АН-140. Выбор ГТД определялся целью более полной адекватностью физической модели в части стабильности параметров момента нагрузки и частоты вращения роторных деталей главного редуктора привода. Анализировался сигнал $s(t)$ излучения энергии, выделяющейся при пересопрежении зубьев шестерен в процессе передачи крутящего момента $M(t)$.

В качестве устройств преобразования механических вибраций в электрический сигнал были определены датчики виброускорения АВС177 с максимальной частотой преобразования 30 кГц (линейность амплитудно-частотной характеристики не хуже 1 дБ). Чувствительный элемент датчика преобразует плотность потока энергии сигнала вибраций $s_v(t)$, в соответствии со своей весовой функцией $g(t - \tau)$, в выходной сигнал:

$$s(t) = \int_0^{\tau} s_v(\tau, \Delta t) g(t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

$$\tau \in (\Delta t) \in t$$

где τ – постоянная времени преобразователя, соответствующая его резонансной частоте.

Аналого-цифровое преобразование выполнялось аппаратурой МІС-300 с частотой дискретизации $f_d = 1/\Delta t = 216$ кГц. Анализировался сигнал горизонтальных вибраций опоры ведущей шестерни главного редуктора. Нагрузка двигателя изменялась: от $0.6M_{\max}$ (0–25)с, M_{\max} (26–50)с и $0.6M_{\max}$ (51–180)с. Интервал времени окна анализа выбран $T_a = 1$ с из сообра-

жений информационной точности определения девиации частоты пересопряжения.

На рис.1 приведен график изменения анализируемого сигнала $s(t)$ во времени.

Анализ изменения первой производной $\frac{ds(t)}{dt}$ функции позволяет сделать вывод о достаточной частоте дискретизации исследуемого процесса. На данном этапе мы не учитываем интегральные процессы (4) диссипации энергии сигнала вибраций и акустической эмиссии в кристалле преобразователя АВС117. Над графиком приведены статистические параметры

СП на интервале времени 820 мс, их анализ позволяет сделать вывод о несоответствии ФРПВ нормальному закону.

На рисунке 2 приведены результаты анализа функций статистических параметров ФРПВ(1), рассчитанных на интервале времени T_a , в части соответствия гипотезе о стационарности.

На рисунках 2, 3 приведены результаты анализа функций статистических параметров ФРПВ(1): математического ожидания и среднего квадратического отклонения, рассчитанных на интервале времени T_a , в части соответствия гипотезе о стационарности

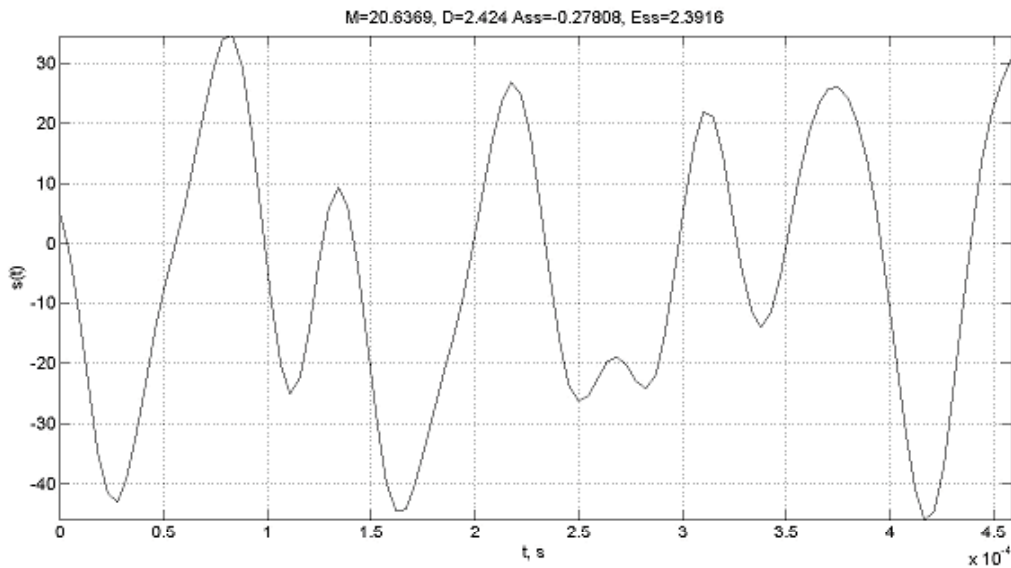


Рис. 1. График изменения сигнала виброускорения во времени

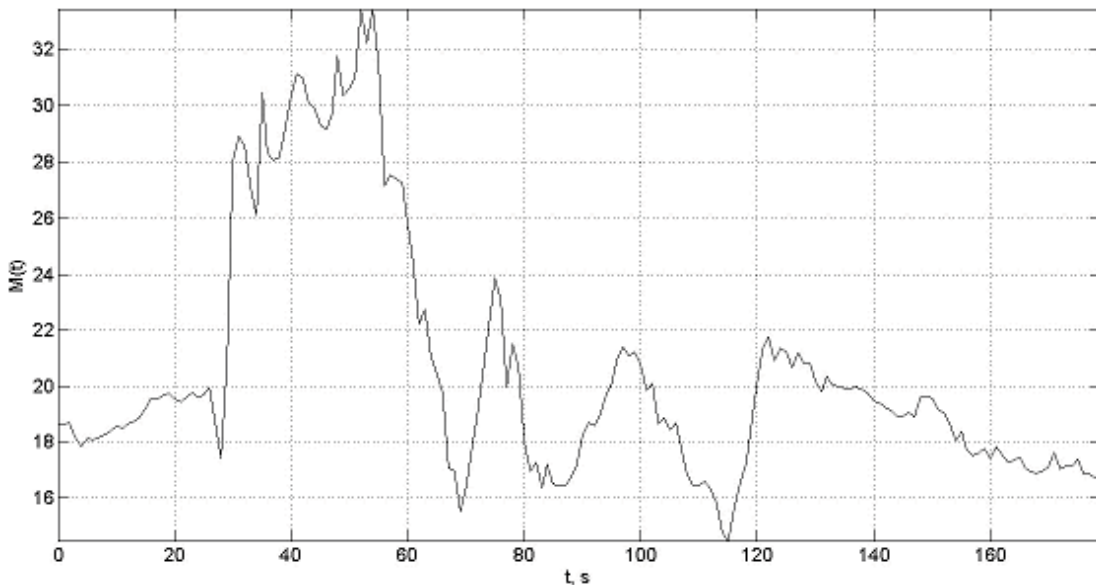


Рис. 2. График изменения математического ожидания

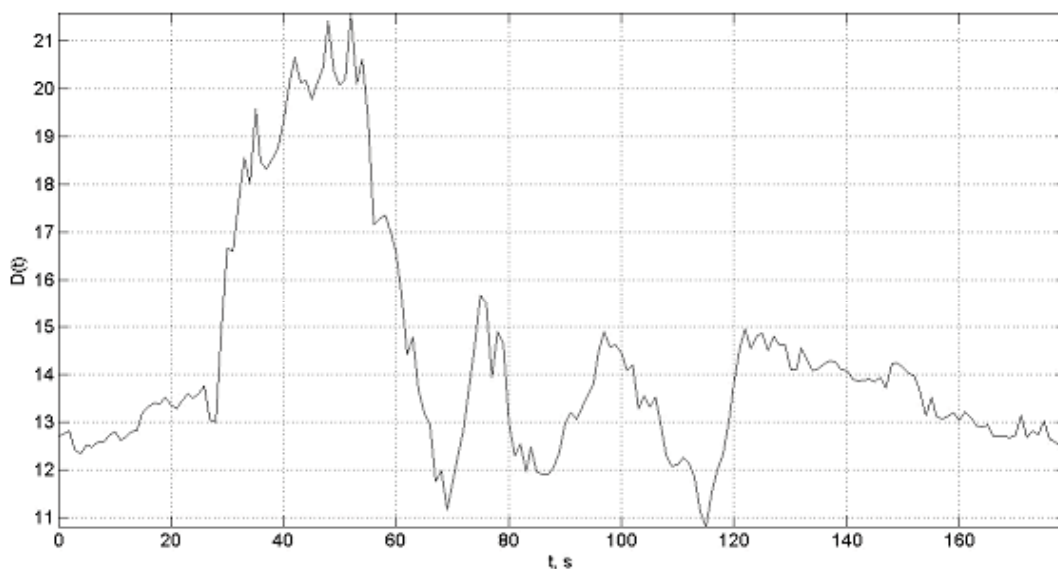


Рис. 3. Графики изменения среднего квадратического отклонения

Анализ вариабельности функций статистических моментов позволяет сделать вывод об ошибочности гипотезы о строгой стационарности ВС, что свидетельствует о неадекватном применении метода спектральных преобразований, в части определения спектра амплитуд и фаз. Этот вывод позволяет обосновать факты случайного распределения значений погрешности метода и его нечувствительности к незначительным изменениям исследуемого сигнала при зарождении дефектов деталей ГТД.

Для оценки различий временных функций исследуемого сигнала проведен анализ инфор-

мационного расстояния методом расчета коэффициента корреляции Пирсона $r_s(t)$ [4]. График рассчитанной функции приведен на рис. 4.

Анализ показывает, что коэффициент корреляции изменяется от минус 0,5 до плюс 0,5, что свидетельствует о практически полной «непохожести» сигналов на интервалах анализа. Однако остается возможность качественного анализа присутствия размытых спектральных составляющих со статистическим определением (осреднением) амплитуд методом расчета спектральной плотности мощности в соответствии с теоремой Винера-Хинчина.

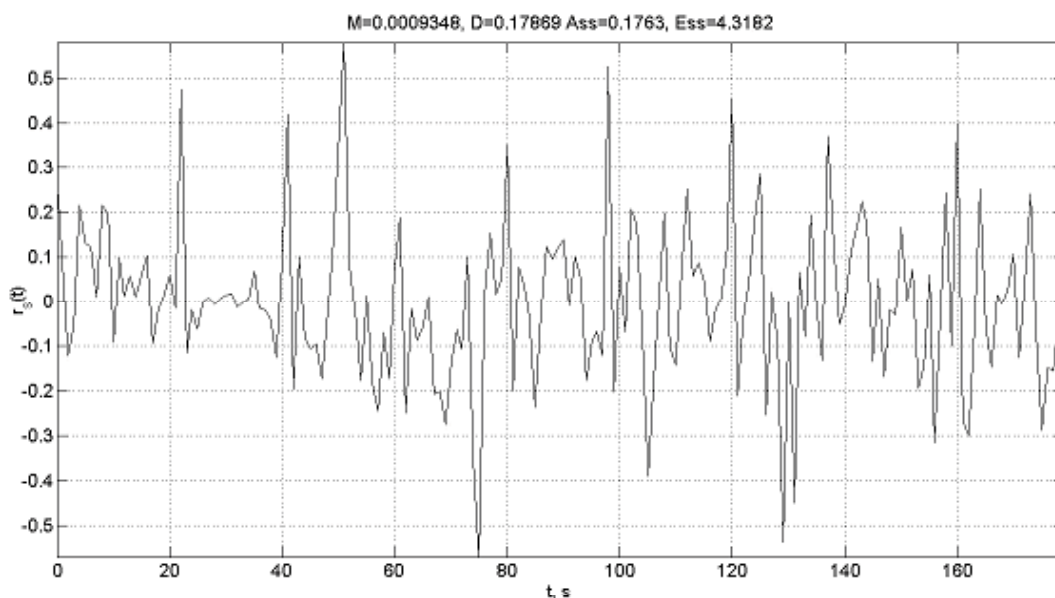


Рис. 4. График изменения коэффициента корреляции

Для подтверждения гипотезы квазистационарности, в части корректного применения теоремы, проведен анализ в части ослабленного критерия (по А.Я. Хинчину), для этого

исследован график семейства автокорреляционных (2) функций (рис. 5) ВС на интервалах времени T_a , примыкающих друг к другу без перекрытия.

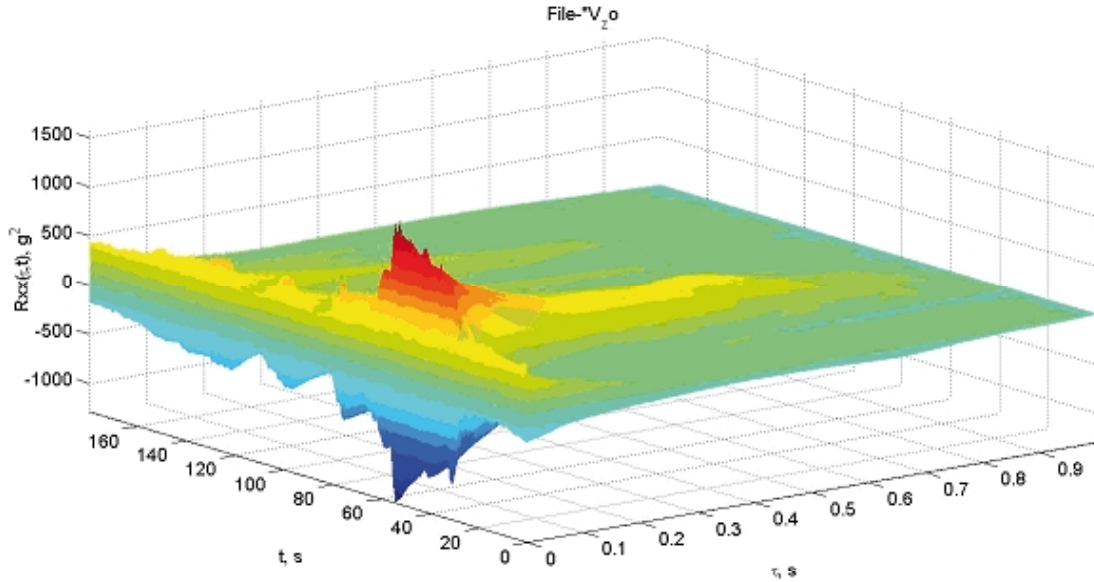


Рис. 5. График семейства автокорреляционных функций

Анализ графиков показывает варибельность функций, как в части интервала стационарности (от 50 мс до 400 мс), так и в части основного энергетического параметра – дисперсии на всех режимах работы ГТД. Данный факт подтверждает предварительный вывод о несоответствия ФРПВ условиям стационарности [4], а также случайности и аналитической неопределенности погрешности метода. Как и при анализе времен-

ной реализации сигнала была рассчитана функция изменения коэффициента корреляции $r_R(t)$ автокорреляционных функций (рис. 6), который отражает процесс варибельности интервала корреляции (3).

Приняв гипотезу квазистационарности сигналов вибраций, для решения задачи спектральной оценки амплитуд роторных и зубцовых сигналов применим метод расчета спектральной плотности мощности:

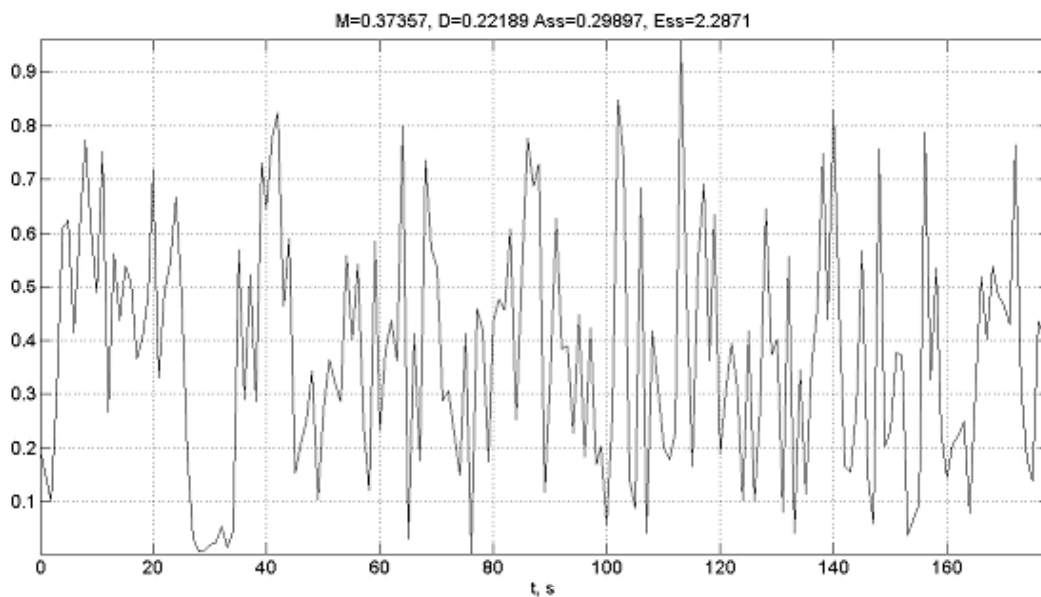


Рис. 6. График изменения коэффициента корреляции автокорреляционных функций

$$N(\omega) = \int_0^{T_a} R_{ss}(t, \tau) \exp(-j\omega t) dt, \quad (5)$$

$t \in [T_a], \omega \in [\Delta\Omega]$

где $\Delta\Omega$ – полоса частот анализа, который, в соответствии с теоремой Винера-Хинчина обладает меньшей погрешностью, чем расчет

спектра амплитуд. Для определения погрешности расчета амплитуд вибраций на роторных и зубцовых частотах был проведен сравнительный анализ результатов расчета спектра амплитуд (в единицах ускорения $g(t)$) (рис. 7) и спектральной плотности мощности (в единицах ускорения на один Гц $g(t)/\text{Hz}$) (рис. 8).

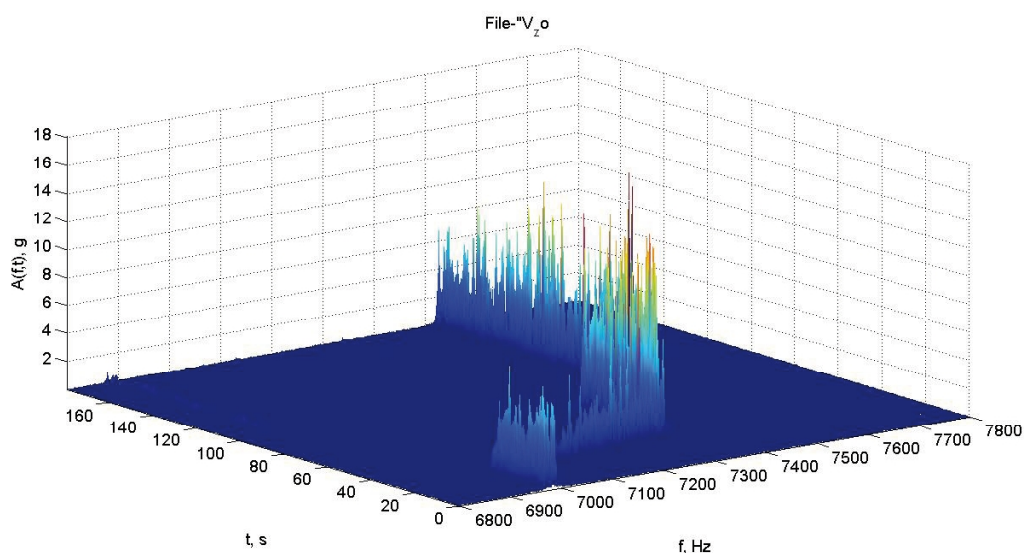


Рис. 7. Графики изменения спектра амплитуд

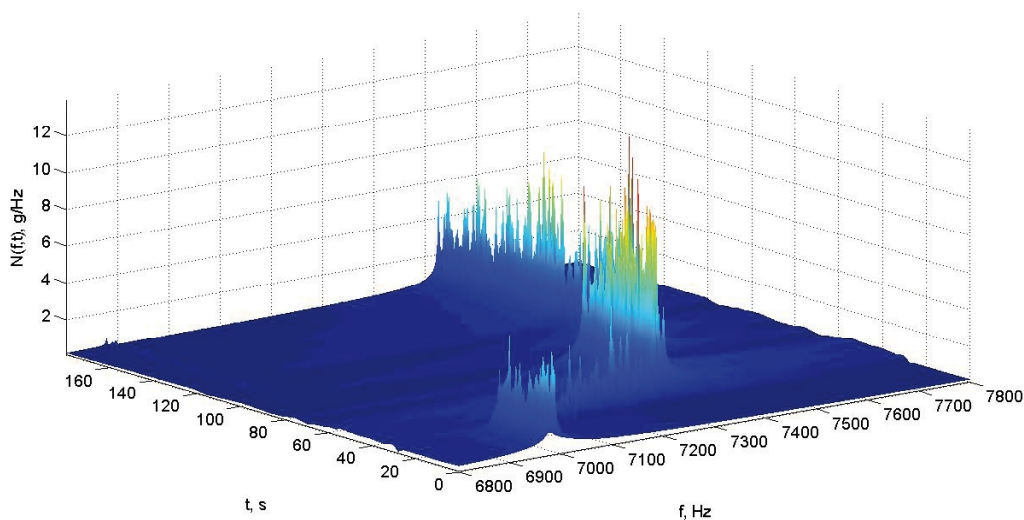


Рис. 8. Графики изменения спектральной плотности мощности

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что метод анализа спектральных амплитуд завышает, в исследуемом варианте, виброоценку, по сравнению с методом анализа СПМ (5) приблизительно на 20%. Подтверждение данного факта требует дополнительных исследований и, в связи с доказанным свойством их случайности, статистической оценки погрешности измерений.

Выводы

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показывает, что установлен факт несоответствия параметров и характеристик исследуемых сигналов требованиям условий стационарности. Можно констатировать, что решена задача определения причин variability погрешности при применении метода спектрального анализа.

В результате анализа вышеизложенного можно сделать вывод о **несоответствии ВС требованиям стационарности на интервале квазистационарности** T_a , что обуславливает:

1. Неполную методическую адекватность метода анализа спектра амплитуд. Результаты применения методов спектрального анализа могут быть применены только в части качественного исследования параметров СПМ вибросигналов роторных деталей редукторов ГТД, при этом необходимо учитывать, что в связи с внутренним методическим анализом АКФ разные вибросигналы могут иметь одинаковые характеристики и параметры СПМ. Необходимо учитывать, что качественная оценка предполагает идентификацию присутствия размытых спектральных составляющих с практически неопределенными амплитудами.

2. При цифровой обработке вибросигналов роторных деталей редукторов ГТД нельзя применять теорему В.А. Котельникова о дискретизации, которая принципиально базируется на свойстве стационарности и жестко связана с верхней частотой анализируемого сигнала, что является отдельной актуальной прикладной

научно-технической задачей.

Принятая гипотеза о квазистационарности ВС позволяет применить метод анализа спектральной плотности мощности. Экспериментально показано, что метод определения спектральных амплитуд завышает, в исследуемом варианте, виброоценку, по сравнению с методом анализа СПМ приблизительно на 20%.

Литература

1. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации. [Текст] / Солодовников А.И., Спиваковский А.М. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 272 с.
2. Статика и динамика механизмов с зубчатыми передачами [Текст] / М.Д. Генкин, Э.Л. Айрапетов – М., «Наука», 1974. – 214 с.
3. Френсис Л. Теория сигналов [Текст] / Френсис Л. – М.: Сов. радио, 1974. – 344 с.
4. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений [Текст] / Брандт З. – М.: Мир, 1975. – 312 с.

Поступила в редакцию 12.06.2014

В.Н. Журавльов, А.В. Папчонков, С.А. Борзов. Методична адекватність спектральної моделі в завданні технічного діагностування роторних деталей редукторів ГТД

Розглядається завдання, суть якого полягає в аналізі адекватності спектральної математичної моделі при технічному діагностуванні стану роторних деталей редукторів газотурбінних двигунів. За результатами експериментальних досліджень зроблено висновок про нестационарність вібросигналів ГТД і поставлено під сумнів факт повної інформаційної адекватності методу гармонійного аналізу. Експериментально доведено, що функції спектральної щільності потужності й спектра амплітуд вібросигналу роторних деталей редуктора відрізняються на всіх режимах роботи двигуна.

Ключові слова: технічна діагностика, спектральна математична модель, роторні деталі ГТД.

V.N. Zhuravlev, A.V. Papchonkov, S.A. Borzov. Method adequacy of fourier model in the technical diagnostic task for rotor parts of gas turbine engine reduction gears

The core of consider task consist of analyze of adequacy spectral mathematical model to help with diagnostics rotor parts of reduction gears of gas turbine engine. According to experimental research was made a conclusion about not steady-state character of vibration signals gas turbine engine and disprove the fact of fully information adequacy Fourier analysis method. Experimentally proof spectral density and spectral analyze vibration signal of rotor parts of reduction gears is differentiate during engine behavior.

Key words: technical diagnostic, spectral mathematical model, rotor parts of gas turbine engine.