

В.Н. Журавлёв, Т.В. Критская, А.В. Папчёнков

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОКНА АНАЛИЗА  
НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ  
СПЕКТРОВ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ГТД**

*Аннотация. Проведен анализ длительности окна анализа спектральной обработки сигналов датчиков вибраций зубчатых передач газотурбинных двигателей. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена методика, основанная на критерии минимальной дисперсии математического ожидания максимума спектральной плотности мощности сигнала зубцовой частоты. Предложенные математические модели критерия оптимизации длительности окна анализа квазистохастического сигнала вибраций деталей зубчатых передач ГТД в первом приближении адекватны физическим процессам пересопряжения зубьев колёс редуктора и позволяют статистически определить точность методов цифровой обработки.*

*Ключевые слова: Газотурбинные двигатели, вибродиагностика, зубчатые передачи, спектральный анализ.*

**1. Введение. Постановка задачи**

Традиционные методы вибрационной диагностики преимущественно основываются на спектральном разложении сигналов с информационным анализом амплитудного спектра преобразования Фурье либо спектральной плотности мощности [1]. Операции интегрирования (либо свёртки) нестационарного сигнала вибраций на интервале длительности окна анализа определяют большую дисперсию информационных параметров во временной и частотной областях.

Таким образом, важной и актуальной задачей современного двигателестроения является разработка эффективных методов эксплуатационного диагностирования зубчатых передач [3], позволяющих более надежно выделить в сигнале вибраций корпуса двигателя признаки отклонения характеристик деталей редуктора от штатного состояния и дополнить автоматическую систему анализа технического состояния роторных деталей ГТД пятого и шестого поколений.

### 3. Основная часть. Анализ погрешности расчета спектра квазистационарных сигналов

Приступая к изложению теоретических предпосылок необходимо уяснить, что речь пойдёт не об анализе функций, представляющих математическую модель, а об анализе сигналов, отражающих параметры реального физического процесса вибрации корпуса ГТД. Функция, соответствующая сигналу, будет задана в виде таблицы с эквидистантными временными интервалами  $\Delta t_d$  между значениями. Временной интервал определяется частотой дискретизации  $F_s = 1/\Delta t_d$  аналого-цифрового преобразователя.

Нами доказано [2], что на практике исследуемые процессы нестационарны, поэтому необходимо ставить вопрос об адекватности и применимости спектральных представлений к исследуемому классу нестационарных процессов, т.е. к некоторому пересмотру и расширению определений классического спектрального анализа.

Известно, что вычисление амплитудного спектра

$$A(\omega, t) = \int_t^{t+Ta} s(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (1)$$

и спектральной плотности мощности

$$N(\omega, t) = \int_t^{t+Ta} R_{ss}(t, \tau) \exp(-j\omega t) dt, \quad (2)$$

от автокорреляционной функции (АКФ)  $R_{ss}(t, \tau)$  сигнала вибраций связано с операцией усреднения на интервале окна анализа  $Ta$ . Для эргодических стационарных процессов автокорреляционные функции тождественны на любом интервале времени и независимы от  $t$  и поэтому вычисление спектров (1, 2) инвариантно к интервалу усреднения. Координатная разрешающая способность частоты спектральной составляющей  $\Delta\omega$  оконного преобразования Фурье прямо пропорциональна величине интервала времени  $Ta$  и определяется значением  $\Delta\omega = 2\pi/Ta$ . 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.

### Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились путём анализа сигнала датчика поперечных горизонтальных вибраций ведущей шестерни заднего редуктора двигателя ТВЗ – 117ВМА – СБМ1, который проходил стендовые испытания на ОАО "Мотор Сич". Анализируемый сигнал вибраций  $s(t)$ , который содержит сигнал зубцовой частоты  $s_z(t)$  (файл  $z_{zr}317mp$ ), интервалом 1с, был записан приблизительно в середине режима двигателя «земной малый газ», длительность которого 5 мин.

Датчик вибраций имеет линейную фазовую характеристику преобразования до частоты 20000Hz и расположен на расстоянии порядка 100мм от ведущей шестерни. Сигнал датчика фиксировался в цифровом представлении измерительным комплексом МІС300 с параметрами аналого-цифрового преобразователя:  $f_d = 216000Hz$  – частота дискретизации и  $n = 2^{16}$  – количество уровней квантования амплитуды вибраций.

Сигнал задан в виде числового ряда, поэтому для определения оптимального значения интервала окна анализа применим метод минимального изменения функции статистической оценки, а именно - математического ожидания и дисперсии (среднего квадратического отклонения). Рассмотрим на примере проявление принципа неопределенности Гейзенберга – рассчитаем функции коэффициента корреляции сигнала  $r_s(t)$  и его автокорреляционной функции  $r_{Rxx}(t)$  на интервале окна анализа, равном периоду роторной частоты  $Ta = 0.0040648s$ , т.е. с частотным разрешением 1Hz для спектра роторных частот. Результаты расчёта приведены на (рис. 1). На верхнем графике – для временной функции сигнала вибраций, на нижнем – для автокорреляционной функции.

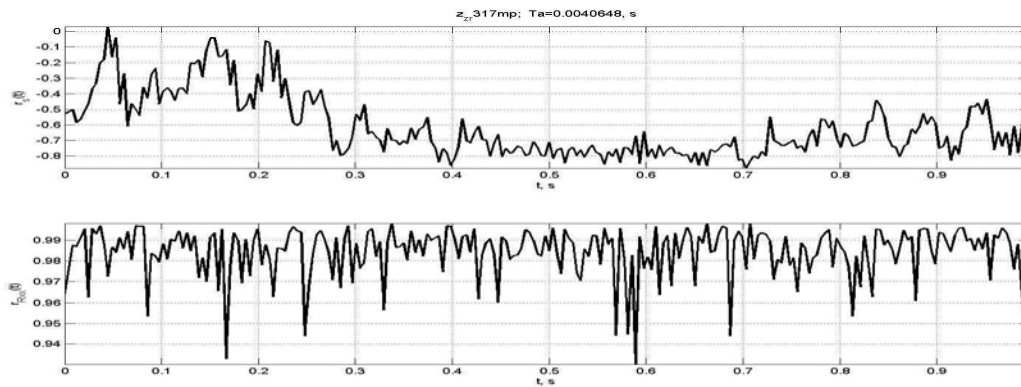
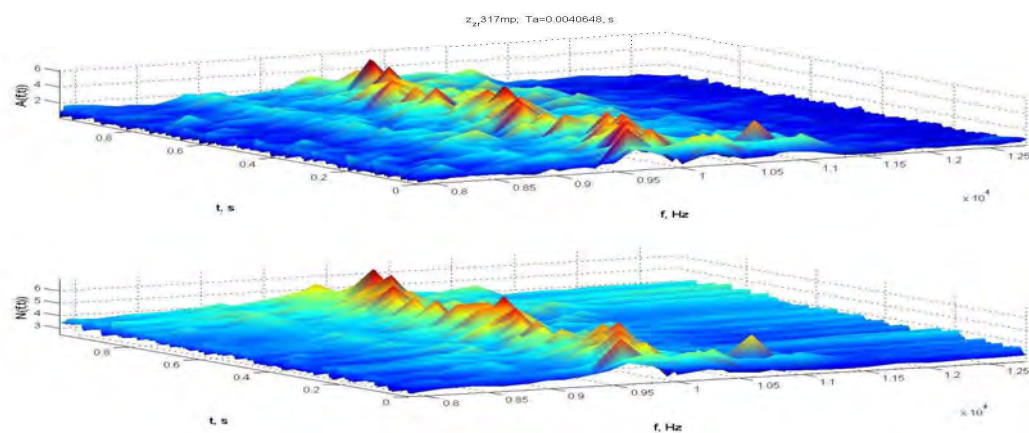
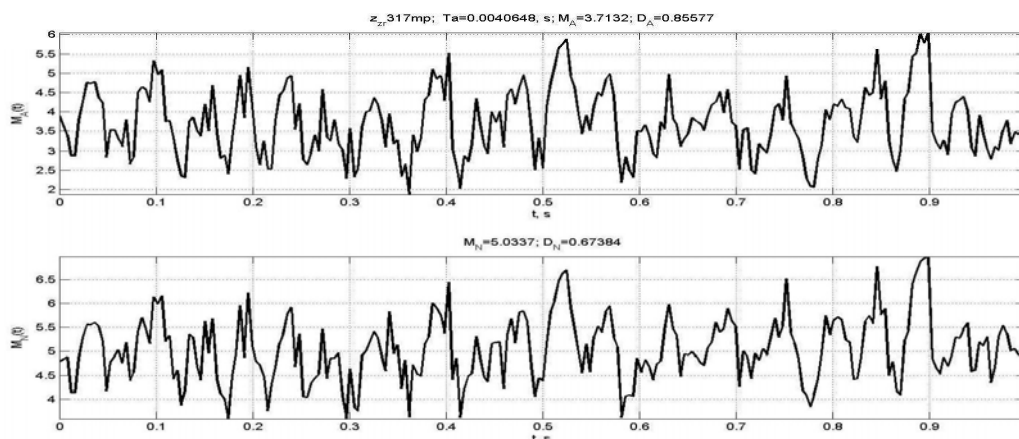


Рисунок 1 - Функции параметра коэффициента корреляции

Рисунок 2 - Графики функций расчета спектра амплитуд  $A(f,t)$  (верхний) и спектральной плотности мощности  $N(f,t)$  (нижний)Рисунок 3 - Графики функций математического ожидания  $M_A(t)$  и  $M_N(t)$  для метода анализа амплитудного спектра и спектральной плотности мощности, соответственно

Анализ графиков показывает, что для временной функции сигналы полностью отличаются, более того, они противофазные на некоторых участках. Для АКФ параметр коэффициента корреляции в целом более 0,95, что свидетельствует о практически полной идентичности спектров анализируемых функций.

Рассчитаны функции амплитудного спектра и спектральной плотности мощности (рис. 2).

Анализ графиков показывает на отличия в постоянной составляющей – порядка  $2g$  для спектра амплитуд и  $3,5g$  для спектра мощности. Можно видеть разницу в амплитуде сигнала, особенно в центре временного интервала. Для уточнения метрологических отличий проведем расчет функции математического ожидания  $M_A(t)$  и  $M_N(t)$ , отдельные точки которой рассчитывались на окнах анализа  $4ms$ . Графики функций приведены на рис. 3.

Над графиками приведены расчеты математического ожидания  $M$  среднеквадратического отклонения  $D$  для каждой из функций. Анализ параметров статистической обработки показывает, что метод анализа спектра амплитуд занижает приблизительно на 20% значение параметра и обладает относительно большим среднеквадратическим отклонением порядка 30%.

Рассмотрим на примере проявление принципа неопределенности Гейзенберга – рассчитаем функции, приведенные в предыдущем подразделе на другом интервале окна  $Ta$ , на порядок большем (рис. 4 – 6)

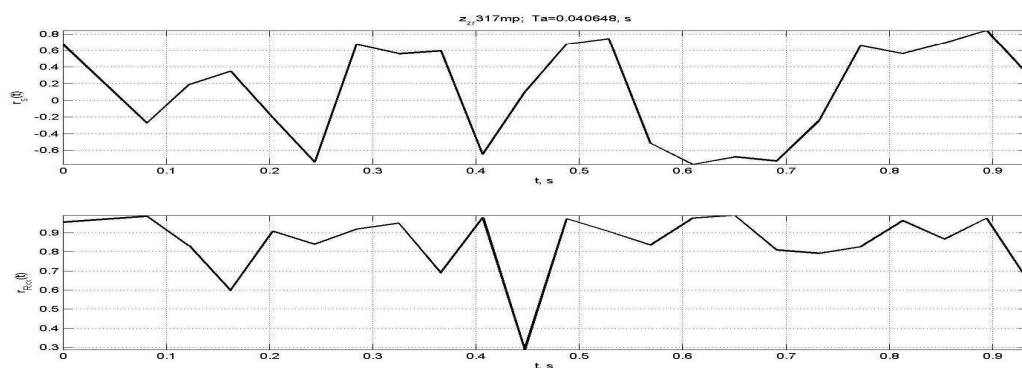


Рисунок 4 - Функции параметра коэффициента корреляции

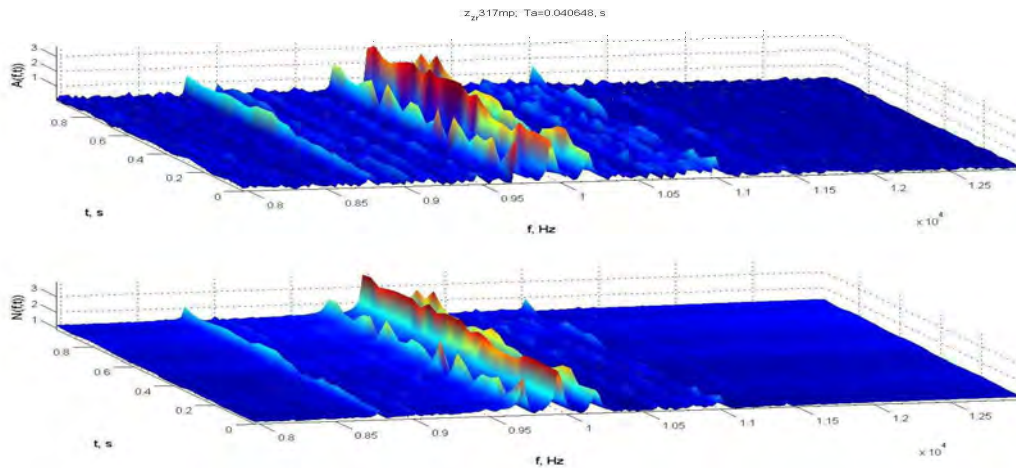


Рисунок 5 - Графики функций расчета спектра амплитуд  $A(f,t)$  (верхний) и спектральной плотности мощности  $N(f,t)$  (нижний)

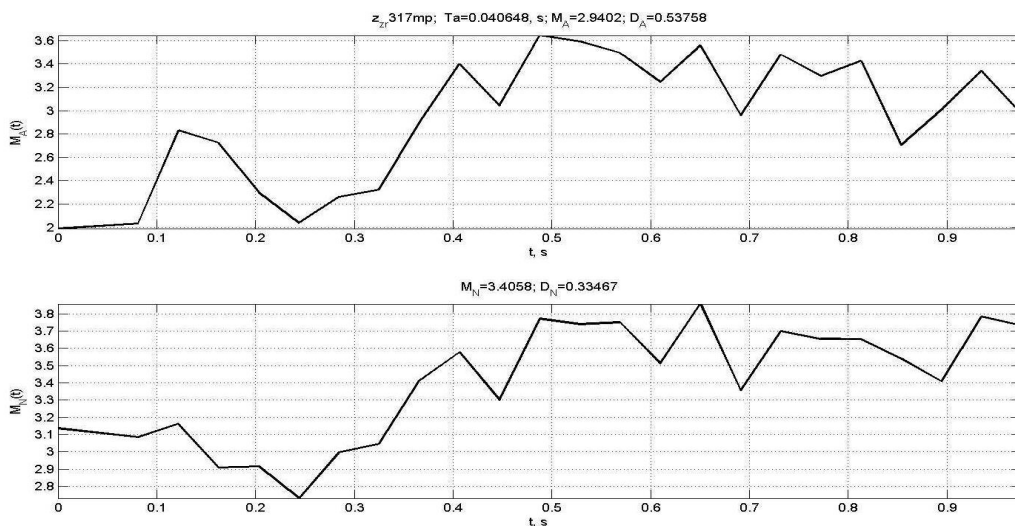


Рисунок 6 - Графики функций математического ожидания  $M_A(t)$  и  $M_N(t)$  для метода анализа амплитудного спектра и спектральной плотности мощности, соответственно

Анализ графиков показывает изменение всех функций, и хуже всего то, что изменились параметры математического ожидания амплитуды спектральных составляющих (на 30%) и их среднеквадратическое отклонение. Проведем анализ минимального интервала окна анализа, при котором данные параметры будут постоянными. Будем рассчитывать параметры амплитудного спектра  $A(f_z, Tr \times n)$  и спектральной плотности мощности  $N(f_z, Tr \times n)$  на зубцовой частоте  $f_z$  при

изменении интервала окна анализа от периода роторной частоты  $Ta = Tr$  с шагом  $0,1Tr$ . Графики рассчитанных функций приведены на рис. 7.

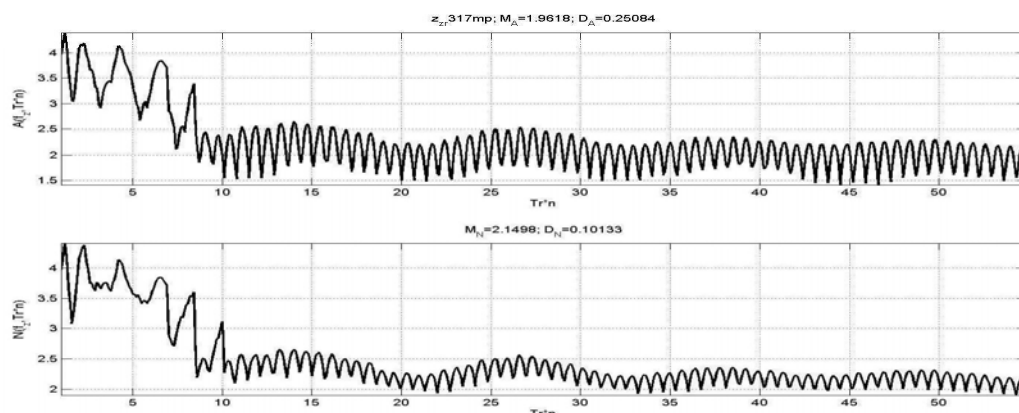


Рисунок 7 - Параметры амплитудного спектра  $A(f_z, Tr \times n)$  и спектральной плотности мощности  $N(f_z, Tr \times n)$  при изменении интервала окна анализа

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что несоответствие сигналов вибраций зубчатых пар требованиям стационарности на интервале интегрирования напрямую влияет на:

- максимум погрешности, который находится в диапазоне от одного до десяти периодов роторной частоты;
- пульсации погрешности, которые наблюдаются после  $n = Z = 41$ , т.е. интервала окна анализа, равного периоду фундаментальной частоты  $Tf = Tr \cdot Z$ , где  $Z$  – количество зубьев шестерни;
- точность расчёта спектральной плотности мощности в два раза выше, чем точность расчёта амплитудного спектра;
- пульсации параметра амплитуды с девиацией порядка 5% от математического ожидания, устранение которых возможно только методами статистического усреднения при изменении интервала окна анализа в пределах периода роторной частоты.

Методы анализа в спектральной области могут обнаруживать сигналы дефектов зубьев шестерён, которые будут больше среднеквадратического отклонения (5% для СПМ и 10% – расчёта амплитуд), этим фактом поясняется пороговая методическая чувствительность к зарождающимся дефектам;

Худшая чувствительность спектральных методов применительно к одиночным дефектам по отношению к групповым дефектам определяется коэффициентом, который пропорционален количеству дефектных зубьев диагностируемой шестерни и фундаментальной частоте пары шестерён.

### Выводы

Решена задача эксплуатационной вибродиагностики зубчатых передач, в том числе, редукторов ГТД.

1. Любые методы вибродиагностики зубцовых нестационарных сигналов, содержащие процессы интегрирования (свёртки) имеют, для сигналов редукторов ГТД, недопустимые погрешности в части анализа зарождающихся одиночных и групповых дефектов зубчатых пар. Этот вывод подтверждается историей развития и применения методов в задачах вибродиагностики. В задачах виброметрии эти методы приемлемы с учетом выводов данного раздела.

2. Относительно достоверные значения оценки частоты и амплитуды вибраций зубчатых пар можно получить при выборе интервала окна анализа не менее периода фундаментальной частоты для конкретного узла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёв В.Н. Методическая адекватность спектральной модели в задаче технического диагностирования роторных деталей редукторов ГТД [Текст] / В.Н. Журавлёв, А.В. Папченко, С.А. Борзов // «Вестник двигателестроения» – Запорожье, АО "Мотор Сич", 2014. – № 2. – С. 221 – 228.
2. Harry J. Decker. Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears [Text] / Harry J. Decker U.S. Army Research Laboratory Glenn Research Center, Cleveland, Ohio/National Aeronautics and Space Administration. NASA/TM—2002-211492. Prepared for the International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society.- Montreal, Quebec, Canada, June 11-13, 2002.
3. Дорофеев В.Л. Система моделирования «AEROFLANK» & прямой синтез износостойких и малошумящих зубчатых передач [Текст] / В.Л. Дорофеев, В.В. Голованов, Д.В. Дорофеев // Авиационно-космическая техника и технология. Вісник НТУ «ХП» – Харьков, 2013. – № 40(1013). – С. 39 – 48.
4. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник [Текст] / Под ред. Э.Б. Вулгакова. М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
5. Кравченко И.Ф. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений [Текст] / И.Ф. Кравченко, А.Б. Единович, В.А. Яковлев, В.Л. Дорофеев // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2008. – № 8. – С. 129 – 134.