

$\alpha = 0,05$, в зависимости от оборотов ротора представлены графически на рис. 1. Так как спектр ЧМ дискретен, кривые получаются ломаными. На рисунке изображены средние значения этих ломаных кривых.

Из графиков можно сделать следующие выводы:

1) применение ССА при измерении роторных вибраций на установившихся режимах не целесообразно, поскольку ширина спектров ЧМ и АМ мало отличается друг от друга;

2) для анализа вентиляторных составляющих применение ССА дает существенный выигрыш в ширине полосы пропускания по сравнению с обычными методами спектрального анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М., «Наука», 1967.
2. Ввнццкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов. М., «Советское радио», 1967.
3. Сидоренко М. К. Виброметрия газотурбинных двигателей. «Машиностроение». М., 1973.
4. Харкевич А. А. Спектры и анализ Государственное издательство технико-теоретической литературы. М., 1953.

В. И. Бояринцев, П. П. Власов

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЛЕДЯЩЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА С ВНЕШНИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Для спектрального анализа узкополосных вибрационных процессов в газотурбинных двигателях целесообразно применение метода следящего спектрального анализа [2, 3].

Известные схемы следящего спектрального анализа можно разделить на две группы. К первой группе относятся системы, в которых управляющий сигнал формируется из спектра сигнала вибрации. В системах второй группы формирование управляющего сигнала осуществляется преобразованием сигнала дополнительного источника, чаще всего тахогенератора, установленного в двигателе.

Примером систем первой группы является американская система для обнаружения неисправностей во вращающихся частях высокоскоростных двигателей CWEA [1]. Структурная схема этой системы представлена на рис. 1. Система состоит из канала измерения, включающего в себя смеситель (СМ), узкополосный фильтр (УФ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ), детектор (Д) и индикатор (И), и канала управления состоящего из полосового фильтра (ПФ), системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и генератора отношения частот (ГОЧ). Принцип работы системы заключается в следующем. С помощью

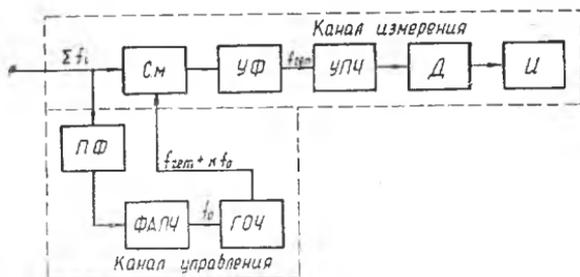


Рис. 1. Структурная схема диагностической системы CWEA

полосового фильтра и системы (ФАПЧ) осуществляется выделение из спектра вибрации составляющей частоты синхронизации f_0 , имеющей определенное превышение по амплитуде над вибрационным шумом. В ГОЧ происходит умножение этой частоты на коэффициент

коэффициент k , равных отношению частоты измеряемой составляющей спектра $f_{изм}$ к частоте синхронизации f_0 , а также сложение с постоянной частотой гетеродина $f_{гет}$.

Полученный сигнал частоты $f_{гет} + \kappa f_0$ ($\kappa = 0 \div 2$) поступает на гетеродинный вход смесителя канала измерения. На другой вход смесителя поступает полный сигнал вибрации Σf_i , где имеется и подлежащая измерению спектральная составляющая $f_{изм}$. На выходе смесителя имеются комбинационные частоты. Разность между частотой управляющего сигнала $f_{гет} + \kappa f_0$ и частотой измеряемой составляющей $f_{изм} = \kappa f_0$ постоянна и равна $f_{гет}$. На эту частоту настроен узкополосный фильтр. Амплитуда выделяемой этим фильтром, пропорциональна амплитуде измеряемой составляющей.

Недостатком системы является невозможность измерений интенсивности составляющей на переходных режимах работы двигателя. Для выбора частоты настройки полосового фильтра (ПФ) должна быть заранее известна частота синхронизации f_0 .

Примером систем второй группы может служить следящий анализатор ЗСА-5, структурная схема которого представлена на рис. 2. Анализатор состоит из канала измерения, аналогичного каналу измерения рассмотренной выше системы, и канала управления, состоящего из смесителя СМ2, местного гетеродина (МГ) и фильтра верхних частот (ФВЧ). На смеситель СМ2 поступают сигналы от тахогенератора с частотой $f_{тах}$ и местного гетеродина с частотой $f_{гет}$. С помощью ФВЧ на выходе смесителя получаем сигнал частоты $f_{гет} + f_{тах}$, который и поступает на гетеродинный вход смесителя СМ1 канала

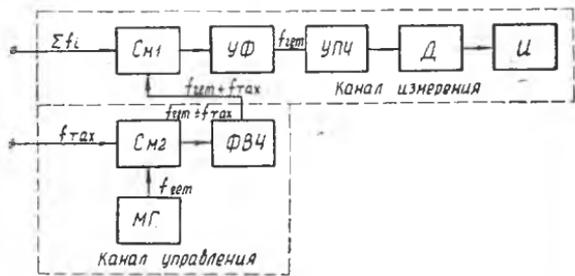


Рис. 2. Блок-схема следящего анализатора ЗСА-5

измерения. Анализатор позволяет измерять первую гармонику роторной вибрации на всех режимах работы двигателя при условии, что частота сигнала тахогенератора $f_{\text{тах}}$ равна частоте вращения ротора $f_{\text{рот}}$.

Система работоспособна только в случае, когда передаточное отношение редуктора равно 1. Кроме того, система не позволяет измерять высшие гармоники роторной вибрации и гармоники вентиляторной вибрации.

Рассмотрение и анализ существующих систем следящего спектрального анализа позволяет сделать вывод, что на основе существующих систем невозможно построить многоканальный следящий анализатор, который может на всех режимах работы двигателя служить устройством формирования признаков в диагностических системах обнаружения неисправностей. Поэтому была поставлена задача расширения возможностей следящих анализаторов, а именно: получение возможности измерения первых и высших гармоник роторной и вентиляторной вибраций на всех режимах работы двигателя. Такая постановка задачи предопределила выбор в качестве прототипа систему с внешним управлением, однако при этом работа системы не должна зависеть от соотношения частот сигнала тахогенератора и вращения ротора.

На основе анализа поставленной задачи предлагается метод построения следящего спектрального анализатора, удовлетворяющего предъявляемым требованиям. Структурная схема предлагаемого устройства представлена на рис. 3. Устройство состоит из канала измерения и канала управления. Канал измерения аналогичен каналам измерения рассмотренных выше систем. Канал управления состоит из последовательно соединенных преобразователя частоты сигнала тахогенератора $f_{\text{тах}}$ в постоянное напряжение U_0 , величина которого пропорциональна частоте вращения ротора, делителя напряжения ДН и управляемого по частоте генератора (Уп.ЧГ). Напряжение на выходе преобразователя равно $U_0 = \kappa_1 f_{\text{тах}}$. Это напряжение поступает через делитель напряжения с коэффициентом передачи κ_2 на вход управляемого по частоте генератора. Частота сигнала на выходе генератора изменяется таким образом, что приращение ее равно частоте измеряемой спектральной составляющей $n f_{\text{рот}}$, то есть $\Delta f = \kappa_3 U_0 = \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 f_{\text{тах}} = n f_{\text{рот}}$. Сигнал частоты $f_0 + \Delta f = f_0 + n f_{\text{рот}}$

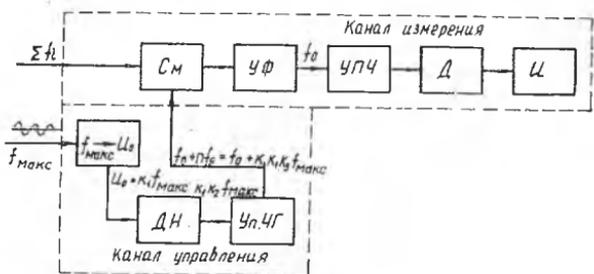


Рис. 3. Структурная схема следящего спектрального анализатора

поступает на гетеродинный вход смесителя канала измерения. Узкополосный фильтр УФ настроен на разностную частоту $f_0 + \Delta f - n f_{\text{рот}} = f_0$. Сигнал на его выходе пропорционален измеряемой спектральной составляющей $n f_{\text{рот}}$. Условием правильной работы устройства является выполнение соотношения $K_1 K_2 K_3 f_{\text{тах}} = f_{\text{рот}}$, что легко достигается выбором коэффициентов передачи K_1 , K_2 и K_3 .

Данное устройство обладает следующими преимуществами:

- 1) возможностью измерения гармоник роторной и вентиляторной вибраций на всех режимах работы двигателя;
- 2) обязательным соблюдением условия $f_{\text{рот}} = f_{\text{тах}}$ для правильной работы устройства;
- 3) простотой переключения анализатора на измерение различных гармоник;
- 4) простотой аппаратурной реализации схемы по сравнению с известными.

Требования к элементам системы определяются необходимой полосой пропускания канала измерения. Для обеспечения глубины диагноза полоса должна быть такой, чтобы в нее не попадали соседние с измеряемой гармоникой составляющие. Анализ спектров вибрации газотурбинных двигателей показал, что максимально допустимая полоса пропускания с этой точки зрения равна 80 гц. Чем узкополосней система, тем выше точность измерения требуемых спектральных составляющих. В то же время минимальная величина полосы пропускания ограничивается температурными и временными нестабильностями частот гетеродина и контуров УПЧ, дрейфом канала управления, нелинейностями характеристики преобразования частоты сигнала тахогенератора в постоянное напряжение и характеристики управления генератора. Учет дестабилизирующих факторов дал следующую формулу для минимальной полосы пропускания канала измерения:

$$P_{\text{min}} = \Delta f_c + 2 \sqrt{(\delta_r f_0)^2 + (\delta_{\text{пч}} f_{\text{пч}})^2} + \Delta f_{\text{п}}^2 + 2 \Delta f_{\text{нел}} + 2 \Delta f_{\text{др}}, \quad (1)$$

где Δf_c — ширина спектра сигнала (при следящем анализе Δf_c определяется лишь шириной спектра амплитудной модуляции);

δ_r — относительная нестабильность частоты генератора;

$\delta_{\text{пч}}$ — относительная нестабильность собственной частоты контуров тракта промежуточной частоты $f_{\text{пч}}$;

$\Delta f_{\text{п}}$ и $\Delta f_{\text{др}}$ — максимальные изменения частоты управляемого генератора, обусловленные соответственно пульсациями управляющего напряжения и дрейфом в цепях постоянного тока канала управления;

$\Delta f_{\text{нел}}$ — максимальное отклонение характеристики управления генератора от линейной.

Для проверки предложенного принципа построения следящего спектрального анализатора и выяснения влияния на него различных факторов был собран макет канала управления. Экс-

перименты показали, что в лабораторных условиях отклонения характеристики управления от линейной в случаях настроек анализатора на измерение первых пяти гармоник роторной вибрации не превышали 3 гц, в случаях гармоник вентиляторной вибрации — 20 гц. Изменения частоты за счет дрейфа в цепях постоянного тока канала управления не превышали 5 гц.

Анализ результатов эксперимента показал, что можно получить минимальную полосу пропускания канала измерения в случае гармоник роторной вибрации порядка 25 гц, в случае гармоник вентиляторной вибрации — порядка 65 гц. Данные полосы удовлетворяют требованиям разделимости соседних спектральных составляющих, и, следовательно, обеспечивают необходимую глубину диагноза. Теоретические проработки показывают, что при необходимости полосы пропускания могут быть сужены до 5 гц в случае измерения гармоник роторной вибрации и до 15 гц в случае измерения гармоник вентиляторной вибрации.

Таким образом, можно сделать вывод, что построение следящего спектрального анализатора по предложенному принципу возможно. При этом система по узкополосности сравнима с лучшими известными системами, но значительно шире их по своим возможностям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акустический анализатор для выявления повреждений во вращающихся частях высокоскоростных двигателей. Патент США № 3400578.
2. Бояринцев В. И., Власов П. П. Оценка эффективности применения следящего спектрального анализа в задачах вибрационной диагностики. Статья в настоящем сборнике.
3. Виницкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов М., «Сов. радио», 1969.
4. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Государственное издательство технико-теоретической литературы, М., 1953.

И. И. Волков, В. В. Мотов, С. А. Прохоров

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ПО МИНИМУМУ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ

В последнее время все большее внимание уделяется вопросам разработки методов и аппаратуры для аппроксимации корреляционных функций стационарных случайных процессов $K_x(\tau)$ функциями заданного вида $f(\tau, \alpha_0, \dots, \alpha_n)$ с неизвестными параметрами $\alpha_0, \dots, \alpha_n$ [1—3].

В большинстве работ, посвященных различным методам решения указанной задачи, не используются точностные критерии [2, 3]. В тех же работах, где делается попытка вести аппроксимацию по тому или иному критерию точности, оценка парамет-