

УДК 621.452:534.1+53.08

А.О. КОСКИН, В.Г. СЕЛЕЗНЕВ

ФГУП «ЦИАМ им. П.И.Баранова», Россия

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН

Предлагается способ определения частот вынужденных колебаний рабочих колес турбомашин, имеющих линейную зависимость от оборотов с константой, определяемой числом лопаток направляющего аппарата или рабочего колеса. Способ апробирован на модельной компрессорной ступени и колесах вентиляторов в системе двигателя. По характеру сигналов тензодатчиков оказалось возможным проводить аналогию между электрическими и механическими колебаниями и с этой точки зрения проводить анализ колебаний рабочих колес. На примере колеса вентилятора показана применимость такого подхода для исследования различного рода частотных характеристик.

Ключевые слова: колебания колес, ступень компрессора, генератор колебаний, амплитудная модуляция, осциллограммы, спектры

В работе [1] на модельной компрессорной ступени были исследованы процессы возникновения и развития автоколебаний по основному тону консольных лопаток, установленных в жесткий диск. Были выявлены характерные признаки возникновения автоколебаний. Отмечалось, что нет четкого представления о том, какие механизмы возбуждения колебаний лопаток реализуются в реальных ступенях компрессоров. Поэтому исследования физической природы колебаний рабочих колес (РК) турбомашин продолжают оставаться актуальными.

В отмеченной работе испытания проводились на изолированной ступени компрессора, состоящей из РК с 32 лопатками и направляющего аппарата (НА) с 36 лопатками. Анализ этих экспериментальных данных, проведенный в настоящей работе, показал, что ступень, состоящая из РК и НА, работает как генератор механических колебаний, режим работы которого зависит от параметров газового потока, а частота колебаний определяется частотой вращения ротора и числом лопаток НА.

На рис.1 приводятся спектры колебаний лопатки на режимах возникновения автоколебаний, взятые из работы [1]. Видно, что на режиме №1 частота $f_0 = 544$ Гц, трактуемая как частота собственных колебаний лопатки, согласно гипотезе генератора механических колебаний формируется следующим образом:

$$y = kx + b = 328 + 36 \times 6 = 544,$$

где $k = 1$; $b = 36 \times 6 = 216$ – величина, кратная числу лопаток направляющего аппарата; $x = 328$ Гц – частота вращения РК; $y = 544$ Гц – частота колебаний РК.

Аналогичная зависимость имеет место на режиме № 3.

На рис.2 приводятся спектры колебаний лопатки и пульсаций потока для режима №10 при возникновении автоколебаний. Частоту колебаний рабочего колеса от оборотов можно записать по выше установленной зависимости:

$$y = kx + b = 335 + 36 \times 6 = 551,$$

где $k = 1$, $b = 36 \times 6 = 216$; $x = 335$ Гц – частота вращения РК, $y = 551$ Гц – частота колебаний РК.

Таким образом, на примере изолированной ступени было показано, что она ведет себя как генератор механических колебаний.

Установленная закономерность подтверждается другими примерами рабочих колес в системе компрессора низкого давления двигателя. В качестве второго примера рассматривается бандажированное колесо вентилятора №1, данные результатов обработки представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Частоты вращения и колебаний РК

X, Гц	Y, Гц
91,55	312,5
90,10	309,9
88,1	308,5
84,97	303,4
79,83	296,9
72,87	289,1
73,00	287,8
71,07	286,5

Обработав данные в таблице 1 по методу наименьших квадратов, получаем уравнение прямой линии

$$Y_1 = 1,2774 x + 195,3008 .$$

$$Y_2 = 1,2774 x + 196 ,$$

Используя гипотезу механического генератора, получим следующее уравнение

где $b = 196$ кратное числу лопаток направляющего аппарата.

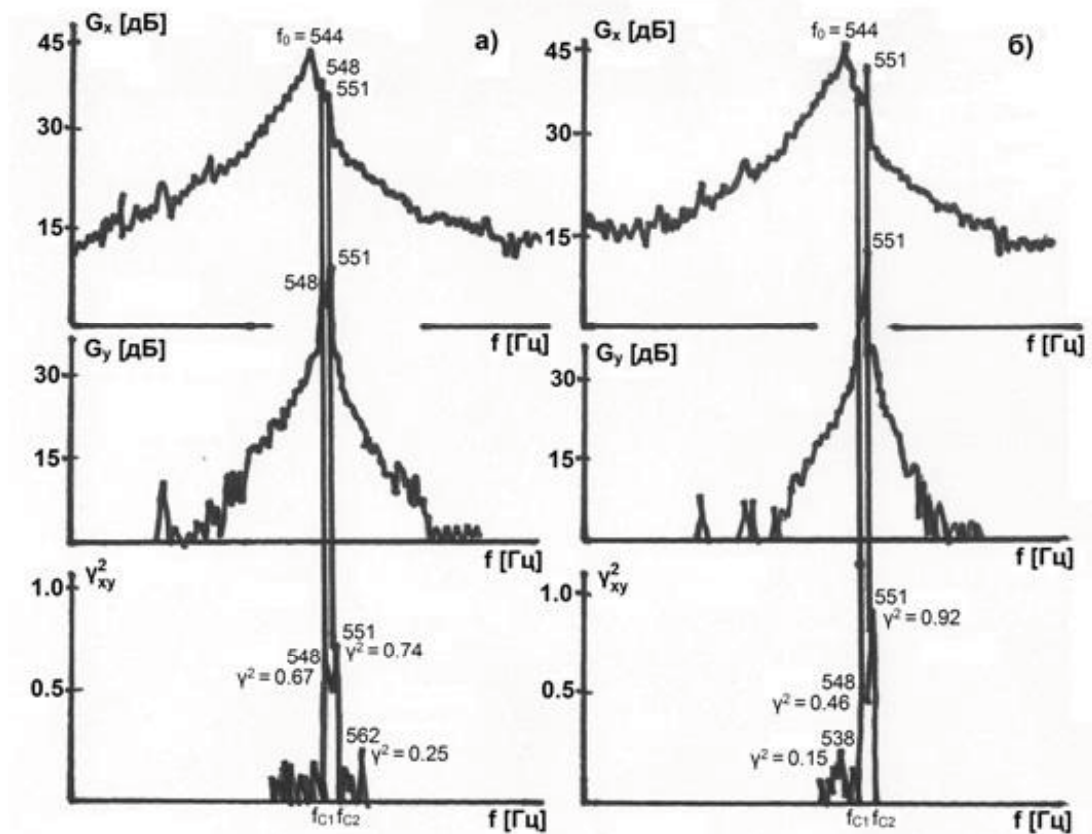


Рис.1. Спектры и функции когерентности колебаний лопаток на режимах возникновения автоколебаний: а – на режиме №1; б – на режиме №3

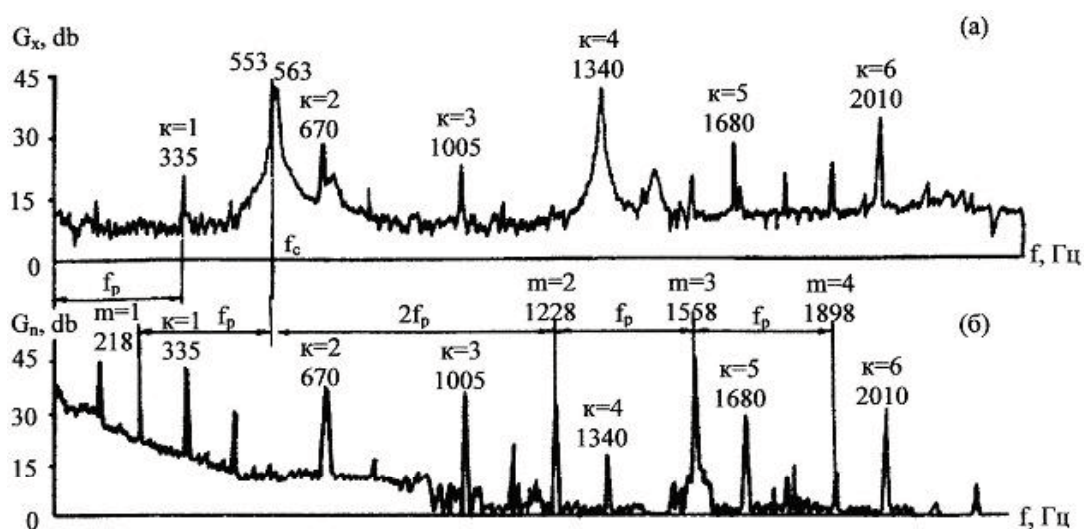


Рис.2. Спектры колебаний лопатки (а) и пульсаций потока (б) на режиме возникновения автоколебаний

Для сравнения значений частот Y_2 и Y составим таблицу:

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и расчетных частот

X, Гц	Y	Y_2
91,55	312,5	312,9
90,10	309,9	311,1
88,1	308,5	308,53
84,97	303,4	304,5
79,83	296,9	297,9
72,87	289,1	289,1
73,00	287,8	289,2
71,07	286,5	286,7

Для этих же оборотов рассмотрим изменение другой частоты:

Таблица 3 – Частоты вращения и колебаний РК

X, Гц	Y, Гц
91,55	372
90,10	309,9
88,1	367,2
84,97	364,6
79,83	358,1
72,87	350,3
73,00	349
71,07	347,7

Обработав данные из таблицы 3 по методу наименьших квадратов и используя гипотезу механического генератора, получим следующие два уравнения:

$$Y_1 = 1,18x + 263,74, \quad Y_2 = 1,21x + 261,$$

где $b = 261$ – кратное числу лопаток рабочего колеса.

Сравним результаты с исходными данными:

Таблица 4 – Сравнение экспериментальных и расчетных частот

X, Гц	Y, Гц	Y_2 , Гц
91,55	372	371,8
90,10	309,9	370
88,1	367,2	367,6
84,97	364,6	363,8
79,83	358,1	357,6
72,87	350,3	349,2
73,00	349	349,3
71,07	347,7	347

На рис. 3 показаны результаты обработки для колеса вентилятора №1.

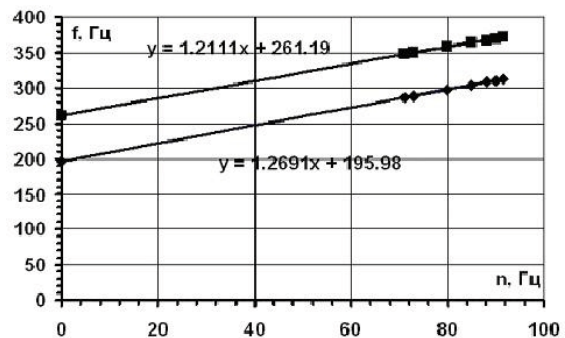


Рис.3. Зависимость частоты колебаний колеса вентилятора №1 от частоты вращения

В качестве третьего примера рассмотрим бандажированное колесо вентилятора №2.

На рис.4 показаны осциллограммы и спектры записей колебаний колеса вентилятора №2. В центре рис.4 представлен график изменения частоты колебаний от оборотов и уравнение прямой линии.

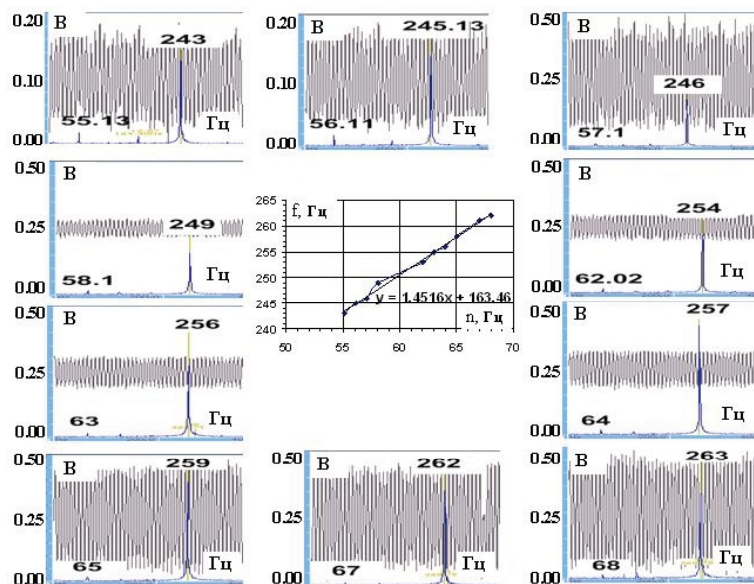


Рис.4. Осциллограммы, спектры и график зависимости частоты колебаний колеса вентилятора №2 от оборотов

Для получения осциллограмм, спектров и таблиц с параметрами колебаний (амплитуда, частота, обороты) зарегистрированных процессов (сигналы с тензодатчиков) использовалась специальная программа цифровой обработки, разработанная в ЦИАМ [2]. График прямой построен по данным из спектров.

Для того же сигнала в автоматическом режиме были получены результаты обработки и сформирована таблица со значениями частот колебаний и вращения колеса. На рис.5 показан график зависимости частот колебаний колеса от частоты вращения.

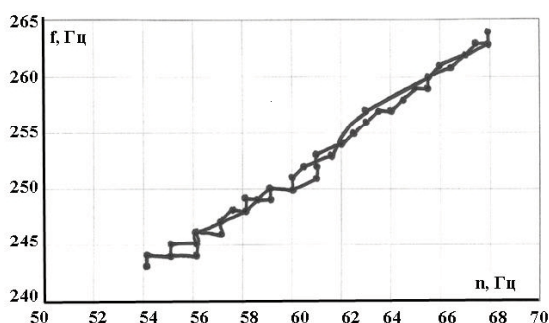


Рис. 5. Зависимость частоты колебаний колеса вентилятора №2 от частоты вращения

Для другого диапазона оборотов проделаем вычисления с ограниченным в два раза количеством экспериментальных данных с разбросом ± 1 Гц как по оборотам, так и по частотам.

Таблица 5 – Частоты вращения и колебаний РК

X, Гц	Y, Гц
54	241
56	246
57	247
58	248
60	250

Обработав данные, приведенные в таблице 5, получим следующие два уравнения:

$$Y_1 = 1,45x + 163,75, \quad Y_2 = 1,433x + 165,$$

где $b = 165$ – кратное числу лопаток рабочего колеса.

Для сравнения значений частот Y_2 и Y составим таблицу:

Таблица 6 – Сравнение экспериментальных и расчетных частот

X, Гц	Y, Гц	Y_2 , Гц
54	241	242,4
56	246	245,2
57	247	246,7
58	248	248,1
60	250	251

На рис. 6 показана прямая, построенная на основании гипотезы механического генератора.

Анализ осциллограмм сигналов тензодатчиков, установленных на лопатках колес турбомашин, показал, что они имеют характер колебаний, вырабатываемых электронными генераторами, и поэтому оказалось возможным проводить аналогию между электрическими и механическими колебаниями. Поскольку уравнения, описывающие работу электронных генераторов давно и хорошо известны, то, перенося эти принципы на работу механического генератора, можно оценить работу ступени турбомашин с иной, не применявшейся ранее, точки зрения, пользуясь установившимися положениями теории электронных генераторов.

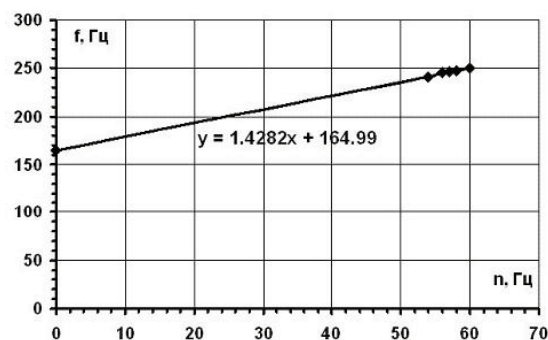


Рис. 6. Зависимость частоты колебаний колеса вентилятора №2 от частоты вращения

Ниже приводится один из таких примеров, когда колебания колеса турбомашин можно оценить исходя из принципов работы электронного генератора, а именно – колебаний, модулированных по амплитуде.

Рассматривается модуляция амплитуды колебаний, задаваемой независимым источником (рабочим колесом) с собственными частотами 318 Гц и 374 Гц.

Модулированное колебание записывается:

$$u(t) = [U_{\omega_0} + bs(t)] \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

где b – коэффициент пропорциональности, связывающий относительное изменение амплитуды с модулирующим сообщением $s(t)$ [3].

Простейшим модулирующим сигналом является гармоническое колебание

$$s(t) = U_{\Omega} \sin \Omega t. \quad (2)$$

Подставляя формулу (2) в (1), получаем

$$u(t) = (U_{\omega_0} + bU_{\Omega} \sin \Omega t) \sin \omega_0 t. \quad (3)$$

Отношение максимального изменения $\Delta U = bU_{\Omega}$ амплитуды модулированного высокочастотного

сигнала к амплитуде U_{ω_0} немодулированного колебания называется коэффициентом модуляции или глубиной модуляции и обозначается символом m :

$$m = \Delta U / U_{\omega_0} . \quad (4)$$

С учетом (4) выражение для амплитудно-модулированного колебания записывается в виде

$$u(t) = U_{\omega_0} (1 + m \sin \Omega t) \sin \omega_0 t \quad (5)$$

Коэффициент модуляции в общем случае является функцией времени и может изменяться в

пределах $0 < m < 1$. Модулированное колебание даже при модуляции простейшим гармоническим сигналом является сложным и состоит из ряда гармонических колебаний. Найдем его спектр, раскрыв скобки в выражении (5):

$$u = U_{\omega_0} \left(\sin \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t - \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t \right) \quad (6)$$

На рис. 7 и 8 представлены осциллограммы колебаний, модулированных по амплитуде, их спектры, удовлетворяющие уравнению (6), а также интерферограммы форм колебаний вентилятора №1.

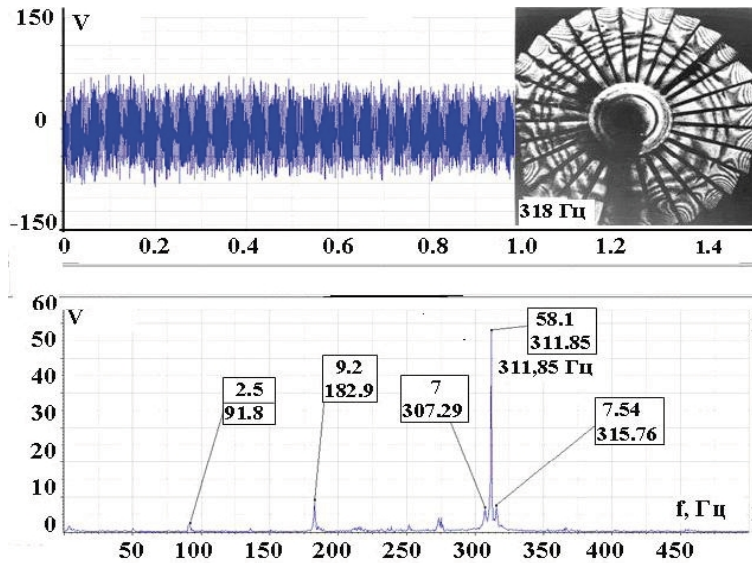


Рис. 7. Осциллограмма, спектр и зонтичная форма колебаний колеса вентилятора №1

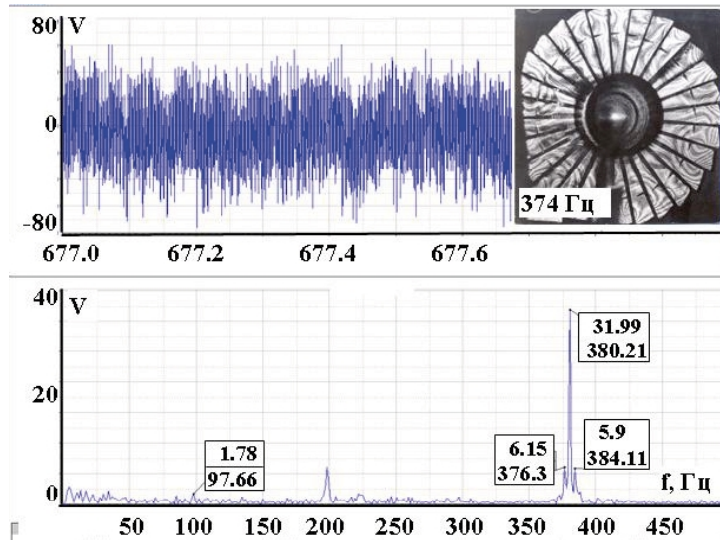


Рис. 8. Осциллограмма, спектр и форма колебаний 3d+O колеса вентилятора №1

В заключение отметим, что гипотеза механического генератора может быть применена для анализа результатов обработки стендовых испытаний рабочих колес турбомашин. Оди-

наковый характер колебаний электронного и механического генераторов позволил идентифицировать колебания рабочего колеса, модулированные по амплитуде.

Литература

1. Кулагина В.А. Исследование процессов возникновения и развития автоколебаний в компрессорных лопатках [Текст] / В.А. Кулагина, А.Я. Родов, А.Н. Федосова // Аэроупругость лопаток турбомашин: сб. науч. тр. ЦИАМ – 1983. - Вып. 2. Тр. ЦИАМ. – №1064. - С.113–115.
2. Ханян Г.С. Система цифровой обработки сигналов для информационного обеспечения стендовых испытаний ГТД [Текст] /

- Г.С. Ханян, Н.В. Шеина // Научный вклад в создание авиационных двигателей: сб. тр. ЦИАМ /под ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. – М.: Машиностроение. – 2000. – Кн. 2. – С.534–536.
3. Кушнир В.Ф. Теория нелинейных электрических цепей [Текст] / В.Ф. Кушнир, Б.А. Ферсман. – М.: Связь. – 1974. – С.254–266.

Поступила в редакцию 06.06.2013

А.О. Коскін, В.Г. Селезньов. Особливості зміни частотних характеристик робочих коліс турбомашин

Пропонується метод визначення частот вимушених коливань робочих коліс турбомашин, які мають лінійну залежність від частоти обертання з константою, що визначається кількістю лопаток направляючого апарата або робочого колеса. Спосіб випробувано на модельному компресорному ступеню і колесах вентиляторів в системі двигуна. За характером сигналів тензодатчиків виявилось можливим проводити аналогію між електричними і механічними коливаннями і з цієї точки зору проводити аналіз коливань робочих коліс. На прикладі колеса вентилятора показано можливість застосування такого підходу для дослідження різного роду частотних характеристик.

Ключові слова: коливання коліс, ступінь компресора, генератор коливань, амплітуда модуляція, осцилограми, спектри

A.O. Koskin, V.G. Seleznev. Peculiarities of engines bladed disks frequency changing parameters

This paper describes the method of determining forced vibrations frequency in bladed disks of engines. Frequencies equation has linear dependence from speed and coefficient, determined by the number of stator vanes or the number of blades in disk. The method was tested at the model of compressor stage and two fans in the engine system. Some times signals from strain gages have the same nature as signals from electronic oscillators, because it was found possible to draw analogy between electrical oscillations and mechanical vibrations. One example was shown with the fan in engine system and the applicability of this approach to study different types of frequency parameters was shown.

Key words: vibrations of bladed disks, compressor stage, generator of oscillations, amplitude modulation, wave forms, spectra.