

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.316:620.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

О.В.ВЛАДИМИРОВ, А.Р.ЗАГРЕТДИНОВ, И.В. ИВШИН, М.Ф. НИЗАМИЕВ

Казанский государственный энергетический университет

*Представлены результаты исследований влияния дефектов на собственные частоты колебаний корпуса турбины турбокомпрессора. Исследования проводились средствами программного обеспечения конечноэлементного моделирования ANSYS и разработанной программы, для формирования виброакустических образов объекта исследования, в среде графического программирования LabVIEW. Проведены экспериментальные исследования с корпусами турбин турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания, с использованием разработанного и созданного измерительно-диагностического комплекса. Работа выполнена в рамках договора с Минобрнауки РФ от «12» февраля 2013 г. № 02.G25.31.0004.*

*Ключевые слова: измерительно-диагностический комплекс, корпус турбины турбокомпрессора, программное обеспечение ANSYS, LabVIEW, модальный анализ.*

Надежность современных энергетических установок, в значительной мере, определяется надежностью их деталей, узлов и механизмов, а также обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) во время производства и эксплуатации. Необходимость проведения ТО и Р должна определяться по результатам контроля технического состояния энергетических установок, что позволяет перейти к обслуживанию по их техническому состоянию. Разработка новых, более точных, объективных, надежных методов контроля технического состояния является, несомненно, актуальной задачей.

Из множества существующих методов контроля технического состояния (тепловой, оптический, радиационный, виброакустический и др.) наиболее точным, объективным, чувствительным к дефектам, позволяющим применять компьютерные технологии, является вибрационный метод [1].

Существующие методы исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и работающих механизмов позволяют с достаточно высокой точностью определять параметры вибрации, выявлять отличительные признаки в колебаниях изделий, связанных с зарождающимися и развивающимися дефектами. Комбинированное применение существующих тестовых и функциональных технологий позволяет создать методику диагностики технического состояния не только деталей, но и работающих механизмов в целом [2].

© О.В. Владимирова, А.Р. Загретдинов, И.В. Ившин, М.Ф. Низамиев  
Проблемы энергетики, 2015, № 5-6

Для планирования эксперимента и получения информативного участка спектра необходимо провести моделирование форм собственных колебаний объекта исследования. Образец имеет сложную структуру, это существенно ограничивает возможность применения аналитических методов оценки собственных колебаний. Данную задачу позволяет решить инженерный компьютерный анализ. Для этого проводится расчет частот собственных колебаний объекта исследования в программном комплексе конечноэлементного моделирования *ANSYS*.

Объектом исследования являлся корпус турбины турбокомпрессора двигателя КАМАЗ на альтернативных видах топлива с диапазоном мощностей 300...400 л.с. и потенциалом выполнения перспективных экологических требований. Турбина с двухзаходным корпусом (рис. 1) из высокопрочного чугуна (ВЧ 50) предназначена для преобразования энергии выхлопных газов в кинетическую энергию вращения ротора турбокомпрессора.



Рис. 1. Корпус турбины турбокомпрессора

Объект исследования для проведения модального анализа в программном комплексе *ANSYS* должен соответствовать заданным габаритным размерам (рис 2).

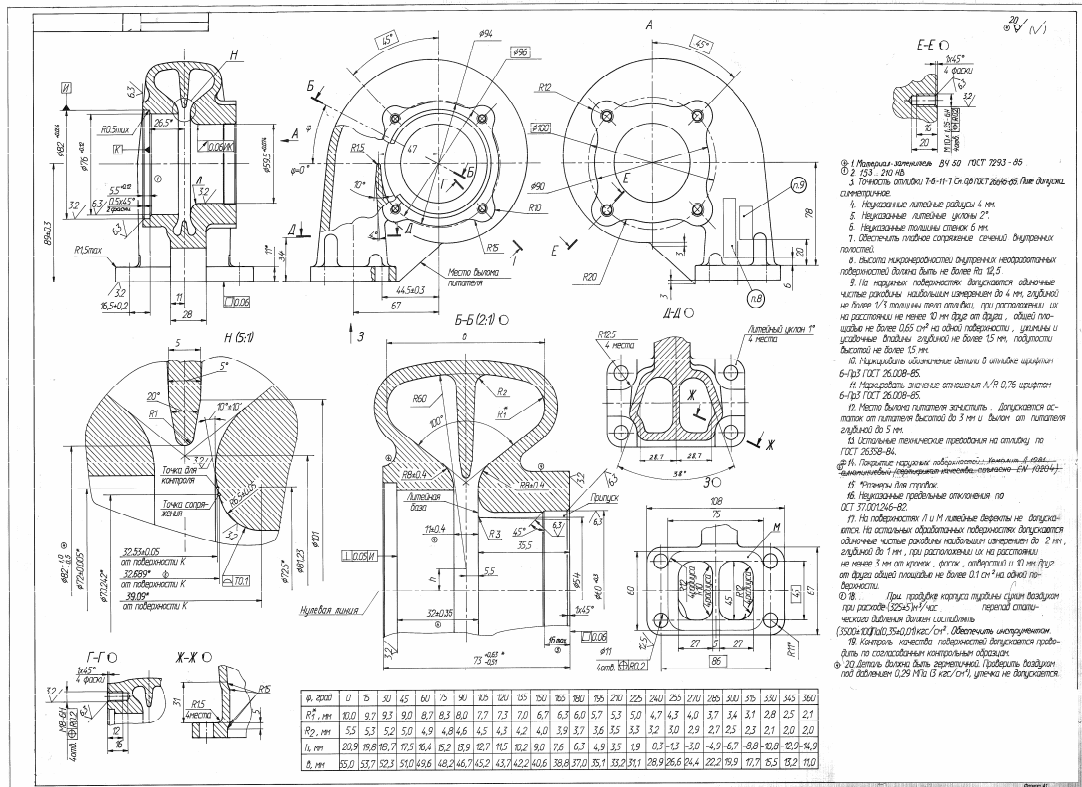


Рис. 2. Чертеж детали корпуса турбины турбокомпрессора

Для проведения модального анализа объекта исследования (дефектный и бездефектный) было принято решение нанести искусственный дефект на корпусе турбины турбокомпрессора (рис. 3) в виде разреза глубиной 10 мм и шириной 2 мм.

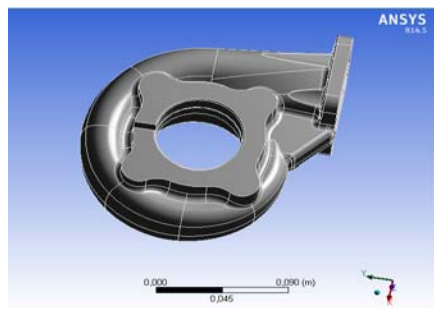


Рис. 3. Дефектный корпус турбины турбокомпрессора

Процедура анализа в программном комплексе ANSYS сводится к следующему:

- построение геометрической модели;
- задание свойств материалов;
- назначение контактных условий;
- выбор опции расчета;
- закрепление конструкции;
- составление списка расчетных результатов в дереве проекта;
- настройки решателя;
- задание параметров сетки и создание сеточной модели;
- проведение расчета;
- просмотр расчетных результатов и подготовка аналитического отчета.

Для выявления информативной части спектра проведен расчет частот собственных колебаний корпуса турбины турбокомпрессора (дефектный и бездефектный). При выполнении пробных экспериментов с объектами исследования основные моды лежали в диапазоне частот от 1000 до 30000 Гц.

Основные различия между модами (область различия) в частотах собственных колебаний бездефектного и дефектного корпуса турбины турбокомпрессора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Частоты собственных колебаний корпуса турбины турбокомпрессора

Мода	Частоты бездефектного корпуса турбины турбокомпрессора, Гц	Частоты дефектного корпуса турбины турбокомпрессора, Гц	Разница в частотах, Гц
1	871,92	873,03	-1,11
2	1448,4	1447,9	0,5
3	1862,9	1858	4,9
4	1964,1	1962,8	1,3
5	2702,9	2697,2	5,7
6	2983,6	2950,5	33,1
7	4436,6	4336	100,6
8	4597,7	4477,8	119,9
9	4744,1	4733,7	10,4
10	5196,9	5090	106,9
11	5285,7	5253,6	32,1

продолжение таблицы 1

12	5391,8	5316,7	75,1
13	5531,3	5512,6	18,7
14	6058,2	6012,4	45,8
15	6190,5	6165,2	25,3
16	6254,9	6225,9	29
17	6650,6	6463	187,6
18	6732,6	6682,7	49,9
19	6911,4	6829,6	81,8
20	7008,6	6947,7	60,9
21	7285	7178	107
22	7586,2	7486,2	100
23	7945,3	7921	24,3
24	8130,9	8118	12,9
25	8499,1	8352,1	147
26	8708,3	8702,5	5,8
27	8858,1	8796,4	61,7
28	9144,9	9045,7	99,2
29	9307,8	9304	3,8
30	9460,6	9364,3	96,3
31	9684	9573,2	110,8
32	9769,7	9749,2	20,5
33	10019	9936,8	82,2
34	10115	10118	-3
35	10281	10230	51
36	10786	10662	124
37	10855	10842	13
38	11130	11070	60
39	11292	11264	28
40	11708	11594	114
41	11815	11797	18
42	11912	11894	18
43	12110	12050	60
44	12205	12113	92
45	12365	12273	92
46	12543	12499	44
47	12634	12579	55
48	12910	12828	82
49	12973	12905	68
50	13153	13005	148
51	13305	13258	47
52	13445	13426	19
53	13822	13540	282
54	13975	13776	199
55	14081	13952	129
56	14189	14045	144

57	14273	14219	54
58	14386	14325	61
59	14563	14507	56
60	14715	14691	24
61	14790	14736	54
62	15077	15066	11

Анализ результатов модального анализа показал, что наиболее информативной частью спектра является диапазон частот 6-8 кГц и 12-14,2 кГц.

Для подтверждения полученных результатов в программном комплексе ANSYS были проведены серии экспериментальных исследований с использованием измерительно-диагностического комплекса (ИДК) [3]. ИДК разработан и создан в рамках договора № 9932/17/07-К-12 от 20.11.2012 г. «Создание семейства двигателей КАМАЗ на альтернативных видах топлива с диапазоном мощностей 300...400 л.с. и потенциалом выполнения перспективных экологических требований». В качестве объекта исследования выступали 4 бездефектных корпуса турбины турбокомпрессора и один дефектный (искусственный дефект в виде разреза глубиной 10 мм и шириной 2 мм).

Схема ИДК показана на рис. 4. В качестве чувствительных элементов используются лазерные виброметры (*LV-2*). Сигналы от лазерных датчиков поступают на многофункциональный модуль ввода-вывода (*NI BNC6251*), откуда оцифрованные данные передаются на персональный компьютер с установленным программным обеспечением *LabVIEW* 13.0.

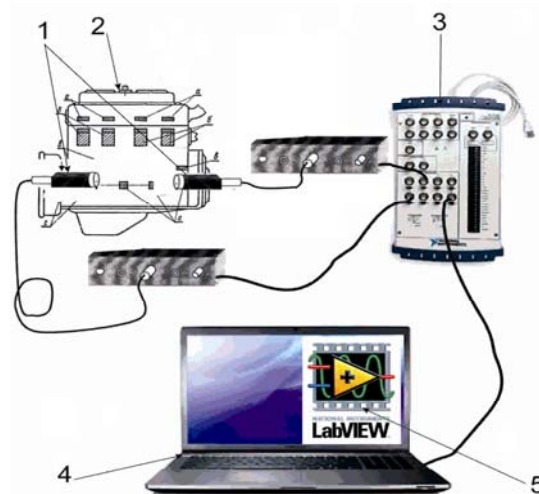


Рис. 4. Схема измерительно-диагностического комплекса: 1 – лазерные виброметры *LV-2*; 2 – объект исследования; 3 – многофункциональный модуль ввода-вывода (*BNC6251*); 4 – персональный компьютер; 5 – программное обеспечение National Instruments

Перед экспериментальными исследованиями проведена подготовка, настройка и регулировка применяемой в измерительном комплексе аппаратуры согласно требованиям, изложенным в технической документации, инструкции по эксплуатации конкретных приборов и ГОСТ. Лазерный датчик устанавливался в любом месте до 5 м от объекта исследования, лазер наводился на точку корпуса турбины турбокомпрессора, как показано на рис. 5, без предварительной подготовки поверхности объекта.



Рис. 5. Точка наведения луча лазерного датчика и место возбуждения свободных колебаний на заготовке корпуса турбины турбокомпрессора

Перед началом испытаний на лицевой панели программы были заданы следующие параметры:

- длина выборки сигнала для получения спектра была выбрана исходя из характеристик применяемых датчиков и составила 8192 отсчетов;
- интервалы частот были выбраны исходя из теоретических исследований и первоначальных экспериментов и составили от 6 до 8 кГц, от 12 до 14,2 кГц
- временной интервал для записи сигнала по 5 ударам составил 15 секунд.
- дополнительно имеется возможность осуществления нормализации спектра.

Для получения информативных характеристик о состоянии объекта исследования производилось 10 измерений. В каждом измерении проводилось по 5 механических ударов. Возбуждение свободных колебаний производилось ударником, выполненным в виде маятниковой системы, что обеспечивало совпадение силы и места удара и соответственно условий проведения эксперимента. Параметры колебания от объекта исследования снимались лазерным виброметром. Сигналы от датчика поступали на многофункциональный модуль ввода-вывода, откуда оцифрованные данные передавались на персональный компьютер с установленным программным обеспечением. Записанный в цифровой форме сигнал преобразовывался в амплитудный спектр с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье. Процедуры преобразований реализованы с помощью программного обеспечения, разработанного в среде графического программирования *LabVIEW* 13.0 [4]. Проводился анализ спектров корпусов турбин турбокомпрессора.

На основе разработанного ИДК проведены экспериментальные исследования с корпусами турбин турбокомпрессора. Спектры бездефектного и дефектного корпуса турбины турбокомпрессора показаны на рис. 6 и 7 соответственно.

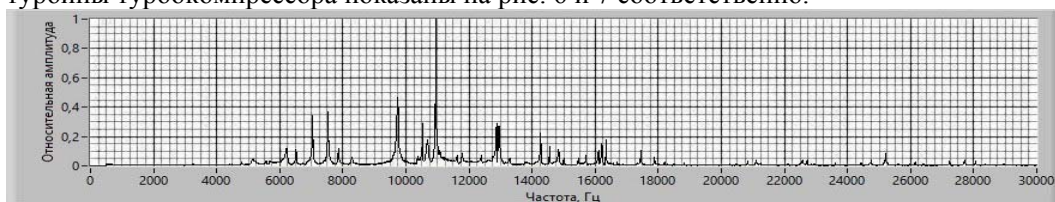


Рис. 6. Спектр бездефектного корпуса турбины турбокомпрессора



Рис. 7. Спектр дефектного корпуса турбины турбокомпрессора

Проведено сравнение спектров на диапазонах частот от 6 до 8 кГц и от 12 до 14,2 кГц (рис. 8, 9). В качестве сравниваемого параметра, характеризующего отличительные особенности текущих сигналов, выбран коэффициент корреляции. Для вычисления выборочного коэффициента корреляции  $r$  используется зависимость:

$$r = \frac{\sum a_i a_{si} - (\sum a_i \sum a_{si})/n}{\sqrt{(\sum a_i^2 - (\sum a_i)^2/n) \cdot (\sum a_{si}^2 - (\sum a_{si})^2/n)}}$$

где  $a_i$  – амплитуда на  $i$ -й частоте текущего спектра;  $a_{si}$  – амплитуда на  $i$ -й частоте эталонного спектра;  $n$  – количество спектров, сравниваемых с эталоном.

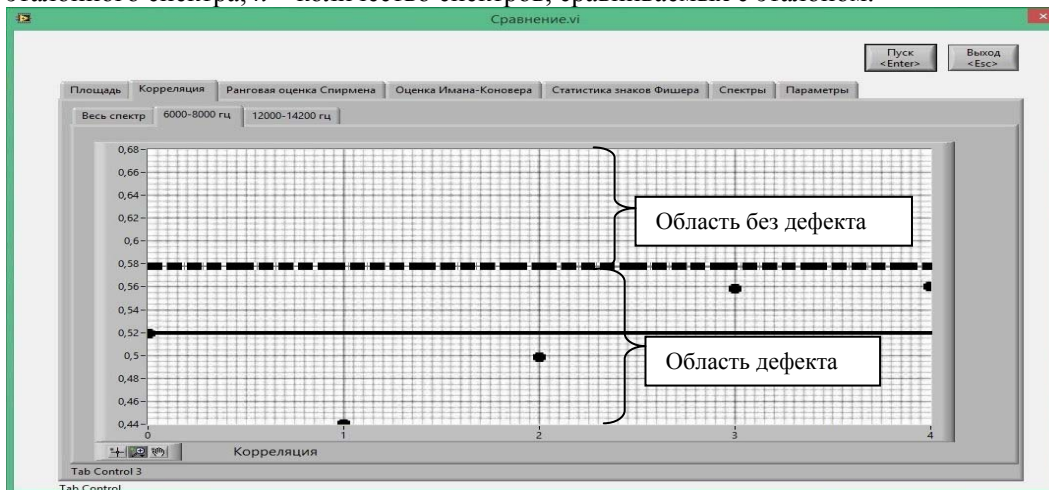


Рис. 8. Сравнение спектров по критерию «коэффициент корреляция» на участке спектра от 6 до 8 кГц

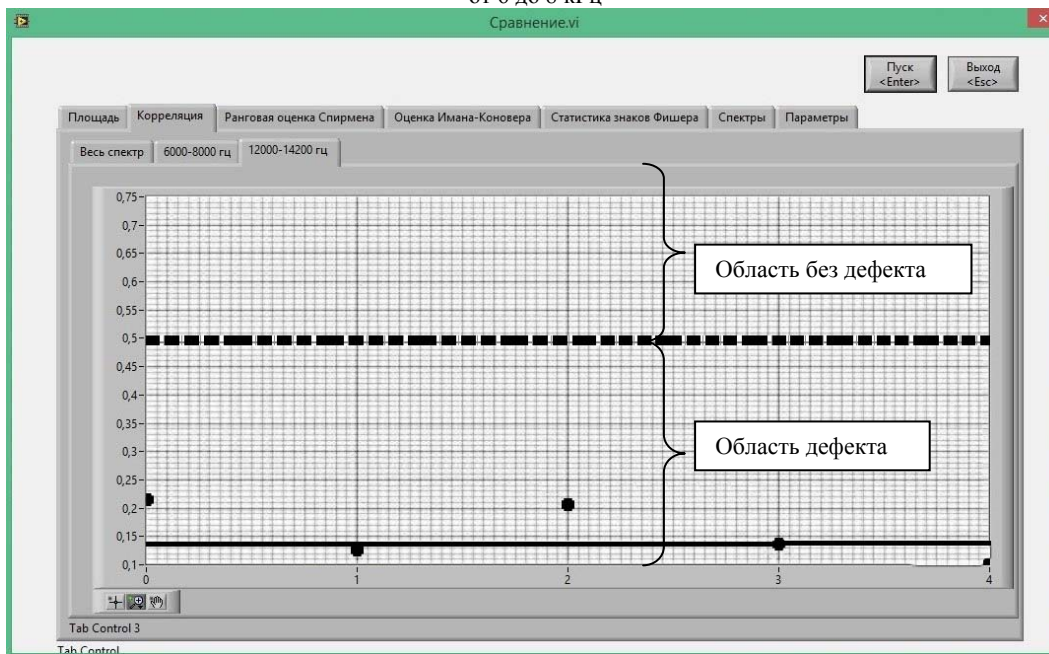


Рис. 9. Сравнение спектров по критерию «коэффициент корреляция» на участке спектра от 12 до 14,2 кГц

По оси абсцисс на рис. 8 и 9 показаны значения коэффициентов сравнения, по оси ординат указаны номера механических ударов, точками обозначены значения коэффициентов сравнения по пяти механическим ударам для соответствующего корпуса турбины турбокомпрессора, пунктирная линия – граница эталонного бездефектного доверительного интервала, сплошная линия – усреднённый коэффициент корреляции. Усредненный коэффициент корреляции дефектного корпуса на обоих участках (сплошная линия) лежит ниже границы доверительного интервала бездефектного корпуса (пунктирная линия), соответственно спектры на этих участках имеют наибольшие отличия, то есть корпус турбины турбокомпрессора признан дефектным.

#### **Выводы:**

1. Выбранные информативные диапазоны частот согласуются с проведенными теоретическими исследованиями.
2. Предложенный аналитический параметр (коэффициент корреляции) показал высокую чувствительность к определению дефекта в объекте исследования.
3. Анализ экспериментов по влиянию дефектов на параметры колебаний корпуса турбины турбокомпрессора подтвердил возможность применения ИДК для контроля дефектов деталей и узлов двигателя внутреннего сгорания в автоматическом режиме.

#### **Summary**

*The results of studies of the influence of defects on the natural frequencies of the turbocharger turbine housing. The studies were conducted by means of finite element modeling software ANSYS and developed a program to generate images of vibro-acoustic research object in the graphical programming environment LabVIEW. Experimental studies on the turbocharger turbine housing using designed and developed measurement - diagnostic complex. Work performed under contract with the Ministry of Education of the Russian Federation from "12" February 2013 № 02.G25.31.0004.*

*Keywords: measuring - diagnostic system, the turbocharger turbine housing, software ANSYS, LabVIEW, modal analysis*

#### **Литература**

1. Ившин И.В. Разработка тестовых и функциональных методов контроля изделий вооружения и военной техники по виброакустическим параметрам / И.В. Ившин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Казань: КВВКУ, 2009. С. 364.
2. Ившин И.В. Информационно-измерительная система для контроля технического состояния работающих механизмов по параметрам вибрации./ Р.С. Саитбаталова, Ю.В. Ваньков, В.А. Гаврилов, Н.К. Мифтахова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 3-4. С. 128-135.
3. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров, Ю.В. Ваньков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. №3-4. С. 108-113.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613692 Программный комплекс для экспресс-контроля деталей двигателя КАМАЗ/ И.В. Ившин, Ю.В. Ваньков, Е.В. Измайлова, А.Р. Загретдинов, М.Ф. Низамиев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГЭУ» №2014611426; заявл. 25.02.2014г.; зарег. 02.04.2014 г.



*Поступила в редакцию*

*03 марта 2015 г.*

**Низамиев Марат Фирденатович** – аспирант 2 года обучения кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел. 8 (927) 245-03-70 E-mail: Marat\_Fizik2@mail.ru.

**Ившин Игорь Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел. 8 (950) 310-89-84 E-mail: ivshini@mail.ru.

**Владимиров Олег Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел. 8 (917) 902-46-09 E-mail: ovlaimirov2011@yandex.ru.

**Загретдинов Айрат Рифкатович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел. 8 (917) 920-77-65 E-mail: azagretdinov@yandex.ru.