



METHODS AND MEANS OF VIBRODIAGNOSTICS OF UNITS OF COGENERATION INSTALLATIONS

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВИБРОДИАГНОСТИКИ УЗЛОВ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Виталий Бабак, e-mail: vdoo@ukr.net, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

Виктор Берегун, e-mail: viktorberegun@i.ua, НТУУ «КПИ имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Александр Красильников, e-mail: tangorov@voliacable.com, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

Abstract: The main methods and means of vibration diagnostics of units of cogeneration installations are considered. Typical malfunctions of units of cogeneration installations and corresponding parameters of vibration signals are given, on the basis of which the possible technical condition of the installations is determined.

Keywords: cogeneration installation, vibrodiagnostics, vibroacoustic signal, vibrational analyzer

1. Введение

При эксплуатации теплоэнергетического оборудования должны быть обеспечены надёжность, долговечность и безопасность как оборудования в целом, так и составляющих его элементов [1, 2]. Это достигается регулярным техническим диагностированием теплоэнергетических установок, которое позволяет обнаружить появление и развитие дефектов и, как следствие, предотвратить аварии и сократить затраты на восстановление работоспособности оборудования.

Одним из объектов генерации тепловой энергии являются когенерационные установки [3, 4], предназначенные для комбинированного производства тепловой и электрической энергии. Работа основных узлов когенерационных установок, таких как газовые и паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, электрогенераторы, трубопроводы и др. сопровождается вибрационными процессами, которые являются источниками информации о состоянии объекта. Поэтому среди различных методов и средств технической диагностики [5, 6], применяемых в теплоэнергетике, одно из основных мест занимает вибрационная диагностика [7–10].

Важной задачей является анализ возможностей современных методов и средств вибродиагностики для технического диагностирования узлов когенерационных установок, систематизация типовых неисправностей таких узлов и соответствующих им параметров вибрационных сигналов, на основании которых определяется возможное техническое состояние установок.

2. Модели и диагностические параметры виброакустических сигналов

В системах виброакустической диагностики носителем информации является виброакустический сигнал, который представляет собой изменяющиеся во времени физические величины (виброперемещение, виброскорость, виброускорение) и является результатом механического взаимодействия деталей в кинематических парах

работающих машин и механизмов. Параметры и характеристики виброакустического сигнала, содержащие информацию о техническом состоянии объекта, принято называть диагностическими признаками его состояния. Связь между состояниями объекта и их отображениями в пространстве диагностических признаков устанавливается на основании диагностической модели вибрационных процессов.

Виброакустическая диагностика (вибродиагностика) – раздел технической диагностики, включающий теорию и методы организации процессов распознавания технических состояний машин и механизмов на основе анализа характеристик и параметров виброакустических сигналов, которые являются наиболее чувствительными к изменениям технического состояния объектов, появлению и развитию повреждений и могут определяться непосредственно на работающем объекте [7, 11].

Виброакустические сигналы представляют собой стохастические колебания, поэтому при построении их математических моделей используются методы теории случайных процессов. В настоящее время наиболее распространённой моделью виброакустических сигналов являются стационарные случайные процессы с дискретным спектром, которые в общем случае могут быть представлены в комплексной форме в следующем виде [12]:

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{i2\pi f_k t}, \quad (1)$$

где γ_k – независимые одинаково распределённые комплексные случайные величины, у которых математические ожидания $M[\gamma_k] = 0$, а дисперсии

$$D[\gamma_k] = \sigma_k^2.$$

Корреляционная функция процесса (1) является почти периодической функцией и равна



$$R(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2 e^{i2\pi f_k \tau}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что дисперсия процесса (1) равна

$$\mathbf{D}[\xi(t)] = R(0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2.$$

Дисперсии σ_k^2 случайных амплитуд γ_k гармонических составляющих с частотами f_k называются спектром случайного процесса (1).

В частном случае, когда случайные величины γ_k и γ_{-k} образуют комплексно сопряженные пары, а частоты удовлетворяют условию $f_k = f_{-k}$, $f_0 = 0$, процесс (1) является действительным и формулы (1), (2) принимают вид

$$\xi(t) = \gamma_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k \cos(2\pi f_k t - \varphi_k),$$

$$R(\tau) = \sigma_0^2 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_k^2 \cos 2\pi f_k \tau.$$

Если частоты f_k являются кратными, $f_k = kf_1$, то корреляционная функция является периодической функцией с периодом $T_0 = 1/f_1$, т. е. $R(\tau) = R(\tau + T_0)$, и дисперсии σ_k^2 равны

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R(\tau) e^{-i2\pi k f_1 \tau} d\tau.$$

Таким образом, основными диагностическими параметрами виброакустических сигналов являются временные характеристики – корреляционная функция $R(\tau)$ и дисперсия $\mathbf{D}[\xi(t)]$ процесса (1), а также его спектральные характеристики – частоты f_k его гармонических составляющих и дисперсии σ_k^2 их случайных амплитуд γ_k .

В дополнение к указанным характеристикам в качестве диагностических признаков также используются [7, 10, 13–15] огибающая корреляционной функции, кепстральные характеристики, а в многоканальных системах – взаимные корреляционные и спектральные характеристики.

3. Методы вибродиагностики узлов когенерационных установок

Техническое состояние объекта характеризуется в определенный момент времени и при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект. Техническое состояние сложного объекта определяется техническим состоянием его составных частей – механизмов, узлов, машин или конструкций.

Различают следующие виды технического состояния объекта (ГОСТ 27.002–89): исправное, работоспособное, правильного функционирования, предельное, неправильного функционирования, неработоспособное, неисправное.

Проведение вибродиагностики состоит из следующих этапов [7, 11, 13].

1. *Определение диагностических признаков.* Предполагаемые диагностические признаки предварительно обоснованы теоретически при построении диагностической модели сигналов. На основании измерения характеристик диагностических сигналов реальных теплоэнергетических объектов с известными техническими состояниями производится выбор тех диагностических признаков, которые оказались наиболее чувствительными к различным состояниям объекта диагностирования.

2. *Формирование обучающих совокупностей.* Обучение представляет собой получение для объектов с известными техническими состояниями диагностических признаков и их накопление, в результате чего формируются обучающие совокупности – множества диагностических признаков, каждое из которых соответствует различным состояниям объекта.

3. *Создание библиотеки эталонов.* Для объектов с известными техническими состояниями библиотекой эталонов являются диагностические признаки, соответствующие этим состояниям. Формирование эталонов соответствующих технических состояний объектов осуществляется усреднением обучающих совокупностей.

4. *Постановка диагноза.* Диагностирование объектов с неизвестными техническими состояниями заключается в сравнении измеренных диагностических признаков с эталонными признаками для известных состояний и принятии решения на основании результатов сравнения. Определение технического состояния объекта базируются на методах математической статистики, и производится на основании статистических решающих правил.

При виброакустической диагностике часто для качественной оценки вибрационного состояния объекта измеряют среднеквадратические значения параметров вибрации (виброперемещение, виброскорость или виброускорение). Измеренные значения параметров сравнивают с параметрами, которые установлены нормами и определяют соответствующее состояние диагностируемого объекта.

Исходя из международного опыта эксплуатации машин и механизмов, рекомендовано ГОСТ ИСО 10816-1–97 различать четыре зоны, соответствующие граничным значениям параметров вибрации (табл. 1).

Таблица 1. Зоны для качественной оценки вибрационного состояния машин

Зона	Вибрационное состояние
А	Новые машины, только введенные в эксплуатацию
В	Машины, пригодные для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков
С	Машины, непригодные для длительной непрерывной эксплуатации
Д	Уровни вибрации достаточны для того, чтобы вызвать повреждение машины

На основании работы [8] и классификации видов технического состояния объекта, к зоне А естественно отнести исправное состояние, к зоне В – работоспособное состояние и правильного функционирования, к зоне С – предельное состояние, к зоне Д – остальные состояния.

Рассмотрим особенности виброакустического диагностирования основных узлов когенерационных установок, регламентируемого нормативными документами, с перечислением основных неисправностей, вызывающих дополнительную вибрацию и соответствующие им частоты.

При контроле состояния машин (ГОСТ ИСО 10816-1-97) измерение вибрации следует проводить на подшипниках, корпусах подшипников или других элементах конструкции, которые в максимальной степени реагируют на динамические силы и характеризуют общее вибрационное состояние. Рекомендуется производить измерения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.

Двигатели внутреннего сгорания. Основные источники вибрации двигателей внутреннего сгорания механического происхождения, вызванные работой кривошипно-шатунного механизма и цилиндропоршневой группы, приведены в табл. 2 [16].

Таблица 2. Источники вибрации двигателей внутреннего сгорания механического происхождения

Источник вибрации	Частота
Неуравновешенность коленчатого вала	kf_0
Силы вращающего коленчатого вала	iKf_0
Перекачка поршня в зазоре	Kbf_0
Силы трения	Kzf_0
k – номер гармоники, 1, 2, 3, ...; f_0 – частота вращения двигателя; i – суммарное передаточное отношение; K – кратность действия возбуждающей силы; b – число перекачек поршня за цикл; Z – число трущихся пар	

Вибрации двигателей внутреннего сгорания могут вызывать также источники газодинамического происхождения, которые возникают при сжигании топлива. Двигатели внутреннего сгорания относятся к машинам с возвратно-поступательным движением. Для таких машин с номинальной мощностью свыше 100 кВт стандартом ИСО 10816-6 предусматривается четыре зоны вибрационного состояния.

Распространенными методами диагностирования двигателей внутреннего сгорания являются спектральные [8, 11, 15], а, например, для выявления задиров цилиндропоршневой группы используется [8, 15] коэффициент эксцесса.

Газотурбинные двигатели. Основные источники вибрации газотурбинных двигателей приведены в табл. 3 [9, 16].

Таблица 3. Источники вибрации газотурбинных двигателей

Источник вибрации	Частота
Неуравновешенность ротора (дисбаланс) с рабочим колесом	f_{δ}
Несоосность (расцентровка) валов	kf_{δ}
Автоколебания вала с рабочим колесом	$kf_{\delta}, lf_{\delta} + mf_{\delta}$
Бой рабочего колеса	$kf_{\delta} \pm lf_{\delta}$
Дефекты лопаток рабочего колеса ($n = 2, 3, \dots$, $m = 1, 2$)	$k[f_{\delta}/n] \pm mf_{\delta}$, [] – целое число
Неоднородность потока	kf_{δ}
Дефекты подшипников	$kf_c, k(f_{\delta} - f_c), kf_i$

f_{δ} – частота вращения ротора; k, l – номер гармоники, 1, 2, 3, ...; f_{δ} – частота автоколебаний; m, n – целые числа; f_{δ} – лопаточная частота; f_c – частота вращения сепаратора в подшипнике качения, f_i – частота перекачивания тел качения по наружному кольцу

Измерительная аппаратура, предназначенная для газовых турбин, должна обеспечивать измерение вибрации в широкой полосе частот, нижняя граница которой равна 10 Гц, а верхняя – не менее чем в шесть раз превышает максимальную частоту вращения ротора (ГОСТ ИСО 10816-4-2002).

Нормы вибрации для границ зон ГТУ со скоростью вращения вала от 3000 до 20000 мин⁻¹ установлены ГОСТ ИСО 10816-4-2002. Основными методами диагностирования газотурбинных двигателей являются [8–10, 14] спектральные методы, применяются также корреляционные методы [10].

Электродвигатели. Электродвигатели относятся к электрическим машинам, их основные источники вибрации электромагнитного происхождения за счёт взаимодействия полей ротора и статора приведены в табл. 4 [16, 17].

Кроме источников, приведенных в табл. 4, присутствуют также источники механического происхождения [16], характерные для работы роторного оборудования: неуравновешенность ротора (дисбаланс), несоосность вращающихся деталей, двойная жёсткость ротора, трение в подшипниках, трение в щётках.

Нормы вибрации для границ зон электрических машин установлены ГОСТ ИСО 10816-3-2002, в частности для машин с жесткими опорами номинальной мощностью от 300 кВт до 50 МВт со скоростью вращения вала от 3000 до 20000 мин⁻¹ и высотой оси вращения вала выше 315 мм.

Спектральные методы являются основными при определении неисправностей электродвигателей [8, 9, 11].

Таблица 4. Источники вибрации электрических машин электромагнитного происхождения

Источник вибрации	Частота
Частота, вызванная магнитными полями	$f_{\delta}Zk$
Основная гармоника	$2f_1$
Частоты взаимодействия гармоник ротора и статора	$f_1[2 \pm kZ(1-S)/p]$
Статический эксцентриситет	$2f_1$
Динамический эксцентриситет	$2f_{\delta}$
f_{δ} – частота вращения ротора; Z – число пазов ротора; k – номер гармоники, 1, 2, 3, ...; f_1 – частота сетевого напряжения; p – число пар полюсов основной гармоники поля; S – скольжение в режиме холостого хода	

Подшипники качения. Неисправности подшипников качения являются одной из основных причин отказов элементов теплоэнергетического оборудования. Основными источниками вибрации подшипников качения являются [8–10, 15, 16] повреждение наружного кольца, повреждение внутреннего кольца, повреждения тел качения, повреждение сепаратора, перекос подшипника в корпусе, неоднородный радиальный натяг.

Правила технической эксплуатации электрических

станций и сетей [8] регламентируют нормы вибрации подшипников электродвигателей, приводящих механизмы на электрических станциях. Основными методами диагностирования подшипников качения являются [8–10, 13, 15, 17] спектральные методы, широко используются также и корреляционные методы [9, 10, 13], исследуются кумулянтные коэффициенты [8, 13, 15] и плотности вероятности [13, 15].

Проведенный анализ показал, что в соответствии с нормативными документами контроль технического состояния основных элементов теплоэнергетического оборудования основан на измерении параметров виброакустических сигналов. Среди методов диагностирования наиболее распространены спектральные методы.

4. Современные средства вибродиагностики

Современные средства для вибродиагностики [8, 9, 18–20] являются приборами и системами сбора, регистрации и обработки виброакустических сигналов. В общем случае такие системы осуществляют преобразование исследуемых виброакустических сигналов в электрическое напряжение, дальнейшего его преобразования в цифровой сигнал, сохранение на жестком диске компьютера и статистическую обработку для получения информативных характеристик исследуемого процесса.

Требования к вибродиагностической аппаратуре, проведению измерений, вибропреобразователям, индикации параметров вибрации и состоянию оборудования, и др. регламентируются соответствующими нормативными документами.

Все вибродиагностические приборы и системы принято делить [9, 19] на два типа:

- портативные – виброметры, сборщики данных, виброанализаторы;
- стационарные – системы виброзащиты, мониторинга, диагностики и анализа.

На современном рынке аппаратуры для вибродиагностики значительное место занимают виброанализаторы – портативные приборы для измерения непосредственно параметров вибрации и осуществления обработки виброакустических сигналов. На рынке Украины наиболее распространены [18] виброанализаторы производства России и Украины – НПП «КонТест», ИТЦ «Вибродиагностика» (Украина); ООО «ИНКОТЕС», НПП «Интерприбор», ООО ПФФ «Вибро-Центр», «ДИАМЕХ 2000», ООО «Ассоциация ВАСТ», Группа «ОКТАВА - Электрондизайн», ООО «Глобал Тест», ООО «ТД «Технекон», ЗАО «Алгоритм-Акустика» (Россия); а также Brüel & Kjær (Дания); Emerson, Fluke Corporation (США).

Виброанализаторы рассмотренных выше производителей базируются на статистическом анализе виброакустических сигналов и измеряют параметры вибрации (виброперемещение, виброскорость, виброускорение), осуществляют спектральный анализ сигналов в диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц с помощью быстрого преобразования Фурье, количество линий спектра которого составляет от 50 до 51200. В отдельных случаях выполняют корреляционный, кепстральный, вейвлет-анализ, позволяют строить гистограммы, находить коэффициент эксцесса. Вспомогательными дополнительными функциями виброанализаторов могут быть измерение скорости вращения, динамическая балансировка роторов в опорах и др.

Наиболее распространенным является спектральный анализ вибраций, который позволяет обнаруживать разнообразные дефекты в элементах тепломеханического оборудования – дисбаланс ротора, рабочего колеса;

несоосность валов; нежесткое крепление; дефекты электродвигателей, компрессоров, насосов, вентиляторов; приводных муфт, зубчатых и ременных передач, подшипников качения и скольжения. Виброанализаторы в большинстве случаев не выполняют диагностику непосредственно, а зачастую используются как измерительный прибор для эксплуатационного контроля оборудования.

Корреляционно–спектральные методы являются исчерпывающими, если виброакустический сигнал имеет гауссовское распределение. В частности, это возможно, когда в модели (4) амплитуды γ_k распределены по закону

Рэлея, а начальные фазы γ_k – равномерно в интервале $[0; 2\pi]$.

Однако в общем случае диагностические сигналы являются негауссовскими [21], поэтому для повышения чувствительности и достоверности виброакустической диагностики необходимо использование негауссовских моделей диагностических сигналов, поиск новых более полных диагностических характеристик и параметров, разработку методов их статистического нахождения. К числу таких характеристик следует отнести, прежде всего, одномерную плотность вероятностей мгновенных значений виброакустических сигналов (1) и амплитуд γ_k , а к параметрам – их одномерные и многомерные моменты и кумулянты.

5. Выводы

Современные приборы и системы для измерения параметров вибрации обычно являются универсальными и используются для эксплуатационного контроля теплоэнергетических установок и, как правило, не позволяют определять их техническое состояние. Поэтому для технического диагностирования узлов когенерационных установок имеющуюся вибродиагностическую аппаратуру необходимо дополнять специализированными техническими средствами, позволяющими адаптировать систему диагностики к конкретной установке или устройству. В основе такой адаптации на начальном этапе проектирования системы диагностики лежат требования нормативных документов, устанавливающие предельные значения параметров вибродиагностических сигналов, соответствующие одному из технических состояний объектов.

Среди методов вибродиагностики наиболее распространены спектральные методы, реже используются корреляционные методы, а также применяются законы распределения (плотности вероятности) и кумулянтные коэффициенты. Дальнейшее развитие методов диагностики состоит в усовершенствовании существующих методов и развитии новых, в частности основанных на использовании числовых характеристик высоких порядков – моментных функций, кумулянтов и кумулянтных коэффициентов.

6. Литература

1. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: Учеб. пособие для вузов. Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др., под ред. А.И. Андрущенко. М., Высш. шк., 1991, 303 с.
2. Беляев С.А., В.В. Литвак, С.С. Солод. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. Томск, Изд-во НТЛ, 2008, 218 с.
3. Комунальна теплоенергетика України [колективна монографія]: стан, проблеми, шляхи модернізації: У 2-х т. Ред.: А.А. Долінський, Б.І. Басок, Є.Т. Базеев, І.А. Піроженко. НАН України, Ін-т техн. теплофізики, Мін-во з

- питань довілля, харч. продуктів та сільськ. госп-ва (DEFRA) Великобританії, Британська Рада в Україні, Т. 1. К., ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2007, 393 с.
4. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: Справ. пособие: В 3 ч. В.Н. Клименко, А.И. Мазур, П.П. Сабашук, под ред. А.И. Мазура. Ин-т прикладных исслед. в энергетике, Ч. 1: Общие вопросы когенерационных технологий. К., ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008, 560 с.
 5. Технические средства диагностирования: Справочник. В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др., под общ. ред. В.В. Клюева. М., Машиностроение, 1989, 672 с.
 6. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др., под ред. В.В. Клюева. М., Машиностроение, 2003, 656 с.
 7. Вибрации в технике: Справочник, в 6-ти т. Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М., Машиностроение, 1981, Т. 5. Измерения и испытания. Под ред. М.Д. Генкина, 1981, 496 с.
 8. Вибродиагностика: Моногр. Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др., под ред. Г.Ш. Розенберга. СПб., ПЭИПК, 2003, 284 с.
 9. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева, Т. 7: В 2 кн, Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии, Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. М., Машиностроение, 2006, 829 с.
 10. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів, ФМІ НАНУ, 2013, 804 с.
 11. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учебное пособие. В.Н. Костюков, А.П. Наumenko, С.Н. Бойченко, Е.В. Тарасов. Омск, НПЦ «ДИНАМИКА», 2007, 286 с.
 12. Гихман И.И., А.В. Скороход. Введение в теорию случайных процессов. М., Наука, 1977, 567 с.
 13. Статистическая диагностика электротехнического оборудования: Монография. С.В. Бабак, М.В. Мыслович, Р.М. Сысак. К., Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015, 456 с.
 14. Карасев В.А., И.П. Максимов, М.К. Сидоренко. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. М., Машиностроение, 1978, 132 с.
 15. Генкин М.Д., А.Г. Соколова. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М., Машиностроение, 1987, 288 с.
 16. Нагорний В.М. Введення в технічну діагностику машин: навчальний посібник. Суми, Сумський державний університет, 2011, 483 с.
 17. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. М., Наука, 1998, 304 с.
 18. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.
 19. Петрухин В.В., С.В. Петрухин. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. М., Инфра-Инженерия, 2010, 176 с.
 20. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР: монография. В.И. Скалозубов, Д.В. Билей, Т.В. Габлая и др., под ред. В.И. Скалозубова. Чернобыль, Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008, 512 с.
 21. Красильников А.И. Модели шумовых сигналов в системах диагностики теплоэнергетического оборудования. К., Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 2014, 112 с.