

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВИБРОСИГНАЛОВ ДИЗЕЛЯ

Ю.В. Волков, к.т.н., доц.,

Санкт-Петербургский Государственный университет промышленных технологий и дизайна
Высшая школа технологий и энергетики

Рассмотрены проблемы, возникающие при определении диагностических параметров вибросигналов дизеля в процессе их подготовки к цифровой обработке. Даны рекомендации по выбору диагностических параметров вибросигналов дизеля и расчету характеристик измерительной аппаратуры для проведения цифровой записи вибросигналов.

Введение

Совершенствование технической эксплуатации дизельных энергетических установок возможно при новой организации стратегии технического обслуживания и ремонта. При такой организации объем и периодичность выполнения операций определяются фактическим техническим состоянием (ФТС) каждого элемента установки. Наибольший экономический эффект достигается за счет полного использования ресурса дизеля [1].

Определение ФТС дизеля при сохранении им работоспособного состояния основано на применении современных средств и методов безразборного функционального технического диагностирования. К перспективным методам диагностирования дизелей относится виброакустический. Его суть заключается в том, что изменение структурных параметров элементов дизеля приводит к изменению параметров вибросигналов [2]. Поскольку вибросигнал обладает определенным множеством параметров, возникает вопрос — какие из них могут быть диагностическими.

1. Выбор диагностических параметров вибросигналов дизеля

Известно, что любые данные, полученные в результате наблюдения реального физического явления, относят к детерминированному или случайному процессу. Отнесение вибрации дизеля к конкретному типу (детерминированному или случайному) не бесспорно. Так, предполагая, что процессы вибрации дизеля в период рабочего цикла точно повторяют свои значения в течение некоторого времени, то их можно отнести к периодическим полигармоническим процессам [3]. Однако при работе дизеля обязательно происходят события, которые влияют на вибрацию иногда самым непредсказуемым образом (изме-



нение внешних условий, нарушения в работе топливной аппаратуры, масляной системы, системы охлаждения и т. д., включая также человеческий фактор). Поэтому процессы вибрации дизеля принято считать случайными.

Случайные процессы разделяют на стационарные и нестационарные. Нестационарными процессами являются все те, которые не удовлетворяют свойству стационарности. Свойство стационарности — если все статистические моменты и смешанные моменты инвариантны (независимы) во времени. Иначе говоря, нестационарность предполагает наличие тренда (линейного или более сложной формы). Очевидно, что развивающаяся вибрация, сопровождающая деградационные процессы в дизеле на достаточно длительном временном интервале (например, между проведением переборки поршней), носит нестационарный характер.

Также очевидно, что оценка параметров вибрации дизеля производится по отдельным реализациям (записям вибрации) периодов рабочего цикла на коротких временных интервалах, на которых наличие тренда наблюдаться не может, т. е. предполагается что на этих интервалах процесс носит локально-стационарный характер.

Принятие гипотезы о стационарности вибросигнала в ограниченном временном интервале имеет важнейшее значение для выбора дальнейшего пути исследования. Поскольку реализацию случайного процесса нельзя задать явной математической моделью, для оценки свойств

таких данных используют методы оценки их статистических характеристик [4].

Основными статистическими характеристиками являются математическое ожидание и дисперсия, полученные по некоторому множеству реализаций. При случайном стационарном процессе они обладают свойством инвариантности относительно произвольного момента времени.

Для подтверждения предположения о локальной стационарности случайного процесса вибрации были рассчитаны математические ожидания и дисперсии абсолютных значений 10 реализаций виброускорений дизеля 2Ч8,5/11. Для записи виброакустических сигналов использовался измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), в состав которого вошли:

- датчики виброускорений 4328 фирмы Briel & Kjaer с рабочим диапазоном до 20 кГц;
- измеритель шума и вибрации ВШВ-003 (ООО «Измеритель») — в качестве предварительного усилителя, фильтра высоких частот с частотой среза 7 Гц и фильтра низких частот с частотой среза 20 кГц;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП) L-154 (ЗАО «Л-КАРД») с разрешением по частоте 250 кГц, что обеспечило точность оценки СПМ 0,5 %.

Для формирования ансамбля все реализации брали случайным образом (момент начала записи реализаций не был фиксирован относительно угла поворота коленвала) с интервалом около 3 минут. Двигатель работал на полной нагрузке при скорости вращения 1500 об/мин.

Проверка гипотезы была проведена по критерию инверсий. Статистика критерия, определяемая формулой

$$\gamma_i = 1 - \frac{4 \cdot I}{I \cdot (I - 1)}, \quad (1)$$

Таблица

Данные для расчета критерия инверсий реализаций вибросигналов дизеля

Реализация i	Мат. ожидание M_i	Число инверсий $I_i(M)$	Дисперсия $\sigma^2 \cdot 10^4$	Число инверсий $I_i(\sigma^2)$
1	62,0298	3	0,7570	3
2	69,2130	7	1,3512	8
3	64,1229	4	0,7387	2
4	58,7435	0	0,6779	0
5	76,4964	5	1,2658	5
6	59,6367	0	0,8099	1
7	66,8167	2	0,8134	1
8	67,2447	2	0,9218	1
9	63,0158	1	0,9569	1
10	60,5434	—	0,6814	—

где I — число инверсий; l — число реализаций, имеет нулевое среднее значение и дисперсию

$$\sigma_\gamma^2 = \frac{2 \cdot (2 \cdot l - 5)}{9 \cdot l \cdot (l - 1)}. \quad (2)$$

Величина γ_i , начиная с $l \geq 10$, имеет распределение, близкое к нормальному. Поэтому для проверки гипотезы стационарности было использовано неравенство

$$|\gamma_i / \sigma_\gamma| < Z_\alpha, \quad (3)$$

где Z_α — критическое значение нормального распределения при доверительной вероятности $(1 - \alpha)$.

Рассчитанные математические ожидания, дисперсии и число инверсий приведены в таблице.

Анализ полученных значений показывает:

- число инверсий для математических ожиданий составляет 24, теоретическое значение дисперсии инверсий $\sigma_\gamma^2 = 0,037$, а статистика критерия $\gamma_i = -0,0667$. Проверка неравенства

$$|-0,0667 / \sqrt{0,037}| = 0,347 < 1,96$$

позволяет принять гипотезу о неизменности математических ожиданий абсолютных значений реализаций при доверительной вероятности 0,95;

- число инверсий для дисперсий составляет 22, теоретическое значение дисперсии инверсий $\sigma_\gamma^2 = 0,037$, а статистика критерия $\gamma_i = -0,0222$. Проверка неравенства

$$|-0,0222 / \sqrt{0,037}| = 0,115 < 1,96$$

позволяет принять гипотезу о неизменности дисперсий абсолютных значений реализаций при доверительной вероятности 0,95.

Таким образом, случайные вибросигналы дизеля 2Ч8,5/11 являются локально-стационарными. Следовательно, оценка виброакустических сигналов возможна по их статистическим характеристикам.

Из всех статистических характеристик вибросигнала наибольшее количество диагностической информации содержится в функции односторонней спектральной плотности мощности (СПМ) колебательного процесса, поскольку она позволяет исследовать в том числе и частотный спектр. Вычисление СПМ относится к методам спектрального анализа и основано на применении методов цифровой обработки сигналов (ЦОС), требующих учета особенностей объекта диагностирования, в нашем случае дизеля. Итак, сформулированы две задачи — какие особенности дизеля необходимо учесть, чтобы записать вибросигнал в цифровом виде, и какие требования необходимо предъявить к измерительной аппаратуре.

2. Подготовка вибросигналов дизеля к цифровой записи и обоснование требований к характеристикам измерительной аппаратуры

Цифровые методы спектрального анализа основаны на использовании ряда последовательных выборок аналогового сигнала вибрации с преобразованием их в цифровую форму и последующим компьютерным анализом [5]. Получение СПМ в цифровых методах спектрального анализа основано на алгоритме быстрого преобразования Фурье (БПФ) дискретного временного ряда (ДВР). Обычно его записывают в виде [6]

$$X(f) = \int_0^T x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt, \quad (4)$$

где T — длина реализации, с.

Согласно формуле (4), снимая дискретные значения функции $X(f)$ в точках, разделенных на шкале частот интервалом $\Delta f = 1/T$ (интервал Найквиста) в промежутке от минус B до плюс B Гц, можно найти число дискретных значений, необходимое для описания функции $x(t)$:

$$N = \frac{2 \cdot B}{\frac{1}{T}} = 2 \cdot B \cdot T. \quad (5)$$

Поэтому при переводе аналогового сигнала в дискретную форму необходимо правильно выбрать величину интервала дискретности Δt .

Минимальное число отсчетов, необходимое для описания реализаций длиной T при ширине спектра B , определяется формулой (5).

При постоянном шаге во времени максимальный интервал дискретности

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot B}. \quad (6)$$

Для того чтобы дискретная реализация содержала все те же частоты, что и исходный непрерывный сигнал, на каждый период соответствующего колебания должно приходиться по меньшей мере два отсчета (согласно теореме Котельникова). Поэтому наиболее высокая частота (частота Найквиста), которая может быть выделена при дискретизации со скоростью $1/\Delta t$ отсчетов в секунду, равна

$$f_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}. \quad (7)$$

Содержащиеся в исходном сигнале более высокие частоты будут свернуты в диапазон $0-1/(2 \cdot \Delta t)$ Гц и будут неотличимы от более низких частот этого диапазона (маскировка частот). Единственный способ избавиться от этого заключается в том, чтобы еще до аналогово-цифрового преобразования информации подавить в исходном аналоговом сигнале частоты, превышающие частоту Найквиста.

Для этого необходимо перед АЦП установить аналоговый низкочастотный фильтр. Верхнюю частоту пропускания (вырезающую частоту) фильтра задают обычно равной $0,8$ частоты дискретизации:

$$f_H = 0,8 \cdot f_N. \quad (8)$$

Необходимо также иметь в виду, что длина реализации T должна быть существенно больше периода самой низкочастотной составляющей процесса.

Это условие необходимо, чтобы можно было выделить низкочастотные колебания. Иначе эти колебания могут быть приняты за нестационарный тренд. Следовательно, перед переводом сигнала в цифровой вид необходимо убедиться, что период самой низкочастотной составляющей не превышает длины реализации. В противном случае перед преобразованием сигнала его необходимо пропустить через высокочастотный фильтр.

Большой интерес при диагностировании дизелей представляет не весь кинематический цикл, а участки, соответствующие источникам вибрации (например, перекладка поршней). Поэтому длина реализации предполагается соответствующей фазе проявления такого источника:

$$T_{P_i} = \frac{\varphi_{P_i}}{n \cdot \varphi_{\Pi}}, \quad (9)$$

где n — скорость вращения, об/с; φ_{P_i} — угол, соответствующий фазе источника вибрации, град; φ_{Π} — угол кинематического цикла, град.

Исходя из этого можно определить нижнюю частоту пропускания высокочастотного аналогового фильтра. С учетом крутизны спада

$$f_B = 1,2 \frac{1}{T_{P_i}} = 1,2 \frac{n \cdot \varphi_{\Pi}}{\varphi_{P_i}}. \quad (10)$$

Таким образом, отфильтровав исходный вибросигнал, его можно подвергать оцифровке и записи на магнитный носитель. Оцифровка производится АЦП, выбор которого выполняется с учетом формулы (6). Запись оцифрованного сигнала выполняет специальная программа-утилита. В этой программе необходимо решить задачу точности оценки СПМ.

Согласно [7], сглаженная оценка имеет ошибку

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{k}}, \quad (11)$$

где k — количество участков реализации, а разрешение спектральной оценки по частоте задается равенством

$$B_k = \frac{1}{T_k}, \quad (12)$$

где T_k — длина участка реализации.

Очевидно, что минимальная длина реализации должна быть

$$T^{\min} = k \cdot T_k. \quad (13)$$

Следовательно, ошибка оценки спектра будет определяться как

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{B_k \cdot T^{\min}}}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что если B_k — известный параметр, определяемый, например, характеристиками измерительного канала, то длина минимальной реализации может быть определена из соотношения

$$T^{\min} = \frac{1}{B_k \cdot \varepsilon^2}. \quad (15)$$

Таким образом, задаваясь значением ошибки оценки СПМ, можно рассчитывать длину необходимой реализации и необходимое число усреднений n_k .

Заключение

Информативные диагностические параметры вибросигналов дизеля могут быть получены при оценке характеристики СПМ вибросигнала.

Для достижения наибольшей разрешающей способности по частоте и учитывая циклический характер работы дизелей, длина исследуемой реализации должна соответствовать кинематическому циклу.

Рассчитывать параметры измерительной аппаратуры необходимо с учетом продолжительно-

сти участков кинематического цикла и допустимой ошибки оценки СПМ вибросигнала.

Для обеспечения условия устойчивости спектральных оценок частота вращения на всех этапах диагностирования должна быть одинаковой.

Разрешающая способность по частоте с соблюдением одинаковых условий диагностирования будет тем больше, чем меньше частота вращения двигателя.

Литература

1. Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Бельская Е.Н. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. В 3 ч. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2013. Ч. 2. 436 с.
2. Азовцев Ю.А., Баркова Н.А., Гаузе А.А. Вибрационная диагностика роторных машин и оборудования целлюлозно-бумажных комбинатов: учеб. пособие. СПб.: СПбГУРП, 2014. 127 с.
3. Явленский К.В., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение, 1983. 237 с.
4. Жовинский А.Н., Жовинский В.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. М.: Энергия, 1979. 112 с.
5. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
6. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения пер. с англ. М.: Мир. Вып. 1, 1971; вып. 2, 1972. 288 с.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / пер. с англ. М., Мир, 1989. 540 с.