

## ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

*Т.А. Ефремова, С.С. Щеголев*

Рассмотрен метод выявления дефектов асинхронных двигателей на основании спектрального анализа. Приведены основные виды дефектов, в том числе и электрических, поиск которых возможен с использованием предложенного метода. Описан алгоритм проведения спектрального анализа и приведены нормы вибрации по среднеквадратичному значению виброскорости и для высокочастотной вибрации. Выделено четыре оценки нормы вибрации: "хорошо", "пригодно", "допустимо", "недопустимо" и четыре уровня оценки дефекта: "бездефектный", "слабый", "средний", "сильный". Подробно описаны критерии отнесения диагностируемого электродвигателя к конкретной оценке или уровню. Сведены в таблицу результаты исследования партии асинхронных двигателей с указанием точки измерения и списка контролируемых параметров, по данным которых возможна последующая обработка результатов эксперимента.

*Ключевые слова:* дефект; асинхронный двигатель; спектр сигнала; метод спектрального анализа; производственное предприятие.

---

## СПЕКТРАЛДЫК ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ ЫКМАСЫ МЕНЕН АСИНХРОНДУК КЫЙМЫЛДАТКЫЧТАРДЫН КЕМТИКТЕРИН АНЫКТОО

*Т.А. Ефремова, С.С. Щеголев*

Бул макалада спектралдык талдоо жүргүзүнүн негизинде асинхрондук кыймылдаткычтардын кемтиктерин аныктоо ыкмасы каралат. Алардын кемтиктеринин негизги түрлөрү, анын ичинде электрдик кемтиктери каралган, аларды табуу сунушталган ыкманы пайдалануу менен мүмкүн болду. Спектралдык талдоо жүргүзүү алгоритми сүрөттөлгөн жана вибрация ылдамдыгынын орточо-квадраттык мааниси жана жогорку жыштыктагы вибрация үчүн вибрация нормалары берилген. Вибрация нормасын төрт түрдө баалоо: "жакшы", "ылайыктуу", "алгылыктуу", "кабыл алгыс" жана кемтикти баалоонун төрт деңгээли: "кемтиксиз", "алсыз", "орто", "күчтүү" аныкталган. Диагностика жүргүзүлүп жаткан электр кыймылдаткычтын белгилүү бир баага же деңгээлге киргизүү критерийлери кеңири сүрөттөлгөн. Асинхрондук кыймылдаткычтардын партиясын изилдөөнүн жыйынтыктары өлчөө чекитин жана башкарылуучу параметрлердин тизмесин көрсөтүү менен таблицада жалпыланган, ага ылайык эксперименттин жыйынтыктарын кийин иштетүүгө мүмкүнчүлүк түзүлөт.

*Түйүндүү сөздөр:* кемтик; асинхрондук кыймылдаткыч; сигнал спектри; спектралдык талдоо жүргүзүү ыкмасы; өндүрүштүк ишкана.

---

## DIAGNOSTICS OF ASYNCHRONOUS MOTORS BY SPECTRAL ANALYSIS

*T.A. Efremova, S.S. Shchegolev*

The paper considers a method for detecting defects in asynchronous motors based on spectral analysis. The main types of defects, including electrical ones, are given, the search for which is possible using the proposed method. The algorithm of spectral analysis is described and the vibration norms for the RMS value of the vibration velocity and for high-frequency vibration are given. There are four estimates of the vibration rate: "good", "suitable", "acceptable", "unacceptable" and four levels of defect assessment: "defect-free", "weak", "medium", "strong". The criteria for assigning the diagnosed electric motor to a specific rating or level are described in detail. The results of the study of the batch of asynchronous motors were obtained and summarized in a table with an indication of the measurement point and a list of controlled parameters. According to the presented table, subsequent processing of the experiment results is possible.

*Keywords:* defect; asynchronous motor; signal spectrum; spectral analysis method; manufacturing enterprise.

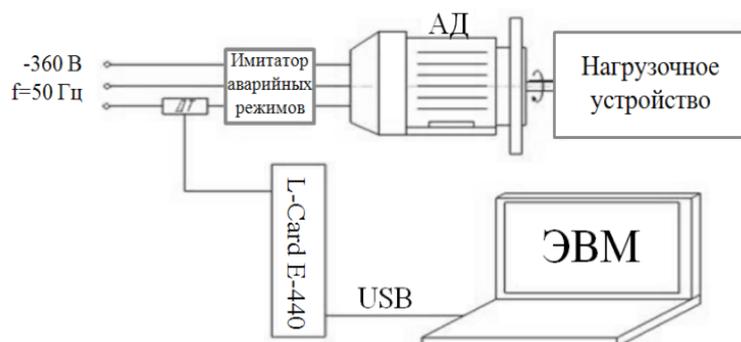


Рисунок 1 – Структура установки для проведения спектрального анализа

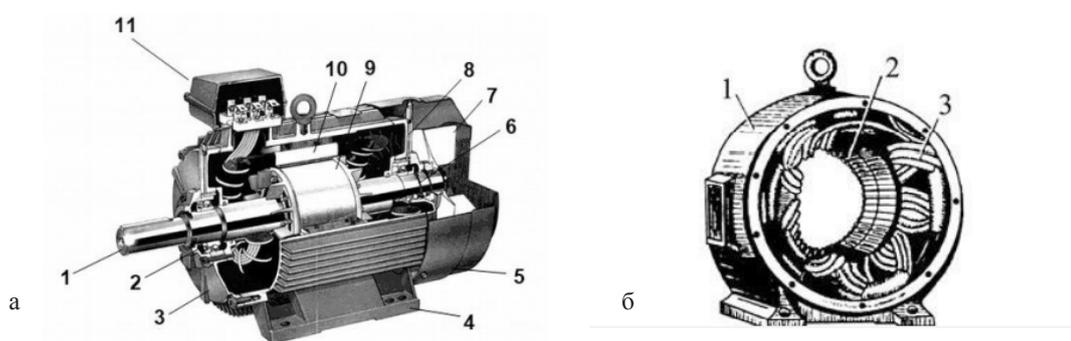


Рисунок 2 – Трехфазный асинхронный электродвигатель с КЗ ротором (а):  
 1 – вал; 2, 6 – подшипники; 3, 8 – подшипники щиты; 4 – лапы; 5 – кожух вентилятора;  
 7 – крыльчатка вентилятора; 9 – короткозамкнутый ротор; 10 – статор; 11 – коробка выводов  
 и статор (б): 1 – станина; 2 – сердечник; 3 – обмотка

В настоящее время асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором широко используются на современных производственных предприятиях. Большое распространение асинхронные двигатели получили благодаря своей простоте, низкой цене и надежности [1–6].

Преимуществом асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, по сравнению с фазным ротором, является отсутствие щеток и контактных колец. АД с короткозамкнутым ротором имеет достаточно большой вращающий момент, что позволяет запускать его под нагрузкой. В АД переменного тока, в отличие от асинхронных двигателей постоянного тока, отсутствует коллекторно-щеточный узел. Такие двигатели имеют более простую конструкцию и соответственно дешевле и проще в эксплуатации по сравнению с АД постоянного тока.

Однако в процессе эксплуатации АД могут возникнуть повреждения элементов двигате-

ля, в результате которых происходит его выход из строя, что приводит к большому ущербу, связанному с простоем технологического оборудования.

Таким образом, диагностика состояния асинхронного двигателя – важная практическая задача, поскольку своевременное обнаружение нарушений работы отдельных узлов системы позволит избежать тяжелых аварий на производстве. Диагностика выявляет неисправности на ранних стадиях их развития, что способствует сохранению энергоэффективности работы машин и повышению технологической надежности и рентабельности.

Известны различные методы диагностики асинхронных двигателей, например, методы, основанные на анализе вибраций или акустических колебаний. В данной работе воспользуемся методом спектрального анализа.

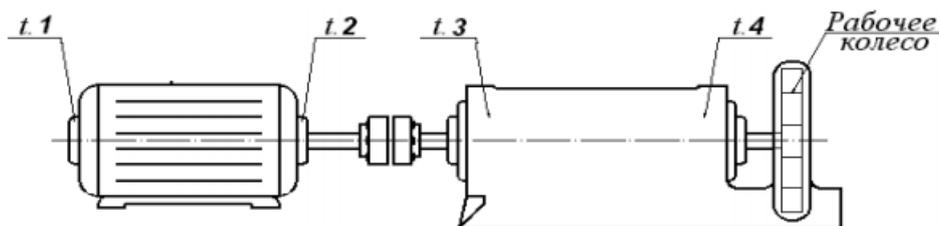


Рисунок 3 – Точки контроля электродвигателя



Рисунок 4 – Алгоритм проведения спектрального анализа

Спектральный анализ – это метод обработки сигнала, позволяющий выявить его частотный состав. Данный метод основан на наблюдении изменения воздушного зазора между статором и ротором.

На рисунке 1 представлена структура установки для проведения спектрального анализа.

Для определения точек контроля рассмотрен внешний вид трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (рисунок 2).

При диагностировании электродвигателя производится сбор данных в 4-х точках контроля (рисунок 3).

Алгоритм проведения спектрального анализа представлен на рисунке 4.

Процесс можно условно разделить на три этапа.

Первый этап – подготовка к вибродиагностике (сбор данных по вибрации, данных по последнему ремонту, устраненных и неустраненных дефектов).

Второй этап – обработка экспериментальных данных и расчет частоты возможных дефектов по частоте вращения ротора машины и геометрическим размерам ее узлов и деталей.

Заключительным этапом является создание алгоритма поиска дефектов в порядке

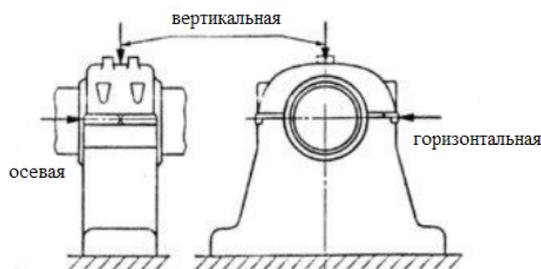


Рисунок 5 – Расположение точек контроля вибрации на корпусе подшипника

вероятностей возникновения различных отказов и последующее планирование профилактических мероприятий.

Основные повреждения, диагностируемые с помощью метода спектрального анализа:

- 1) витковые замыкания в обмотке ротора;
- 2) электрическая несимметрия ротора;
- 3) эксцентриситет ротора;
- 4) эксцентриситет статора;
- 5) несимметрия фаз;
- 6) дефекты подшипников качения.

При эксплуатационном контроле необходимо провести измерения в трех положениях оборудования: вертикальном, поперечном (радиальном или горизонтальном) и осевом. Такие измерения проводятся с помощью трехосевого беспроводного датчика вибрации, который позволяет исследовать колебания в направлениях трех взаимно перпендикулярных осей. Измерение общего уровня вибрации в вертикальном направлении проводится в наивысшей точке корпуса. Поперечная и осевая составляющие измеряются на уровне разъема крышки подшипника или горизонтальной плоскости оси вращения.

Расстояние от места установки датчика до подшипника должно быть кратчайшим, без контактных поверхностей различных деталей на пути распространения колебаний. Повышению достоверности результатов измерений способствует использование в характерных точках приспособлений для быстрой фиксации датчиков в определенных направлениях.

На рисунке 5 представлено расположение точек контроля вибрации на корпусе подшипника.

Измерения проводятся на выступающих частях машин, доступ к которым свободен. При этом необходимо убедиться, что результаты измерений не искажены влиянием локальных

резонансов и соответствуют истинной вибрации подшипника. Для оценки технического состояния проводится измерение среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц. Выбор СКЗ виброскорости для оценки уровня вибраций машин обусловлен физическим смыслом этого параметра, характеризующем величину энергии колебательного процесса. По среднеквадратичному значению виброскорости можно судить об общем состоянии машины.

Для оценки состояния подшипников качения проводится измерение параметров виброускорения в диапазоне частот от 10 до 5000 Гц. Нормы вибрации по значениям среднеквадратичного значения виброскорости в полосе частот от 10 до 1000 Гц представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Нормы вибрации по СКЗ виброскорости

Нормы СКЗ виброскорости, мм/с	Оценка вибросостояния
0–0,71	A – хорошо
0,71–2,8	B – пригодно
2,8–7,1	C – допустимо
7,1 и выше	D – недопустимо

Оценка “хорошо” характеризует практически бездефектное техническое состояние агрегата, поскольку его вибрация находится в пределах регламентированных значений, причем близко от нижней границы. Оценка “пригодно” характеризует малую вероятность отказа при длительной номинально-режимной эксплуатации агрегата, поскольку его вибрация находится в пределах регламентированных значений. Оценка “допустимо” характеризует наличие развивающихся дефектов и возрастание вероятности отказа, поскольку уровень вибрации близок к предельно допустимому значению. Обычно данный агрегат может функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ. Оценка “недопустимо” характеризует высокую вероятность отказа, поскольку вибрация достигает критического значения. В этом случае агрегат нельзя эксплуатировать.

Нормы для высокочастотной вибрации приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Нормы для высокочастотной вибрации

Величина СКЗ ВЧ, дБ	Уровень дефекта подшипника
До 60	Бездефектный
От 60 до 75	Слабый
От 75 до 90	Средний
От 90 до 130	Сильный

Таблица 3 – Диагностические испытания электродвигателя

Результаты измерений									
Точки контроля	Контролируемые параметры								
Наименование механизма	t измерения	СКЗ виброскорости мм/с				высокочастотная вибрация (ВЧ), дБ			
		ПДЗ	В	П	О	ПДЗ	Текущее значение	Уровень дефекта подшипника	Признаки дефекта
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 эксперимент									
Электродвигатель	t1	7,1	1,6	2,0	1,6	130	77	Средний	Дефект смазки
	t2	7,1	1,6	1,5	1,5	130	68	Слабый	Износ тел качения и сепаратора
Насос	t3	7,1	3,8	2,5	2,0	130	72	Слабый	Бой рабочего колеса
2 эксперимент									
Электродвигатель	t1	7,1	2,8	3,2	2,5	130	76	Средний	Дефект смазки
	t2	7,1	2,1	2,3	2,4	130	70	Слабый	Износ тел качения и сепаратора
Насос	t3	7,1	4,4	2,5	2,6	130	75	Слабый	Бой рабочего колеса
3 эксперимент									
Электродвигатель	t1	7,1	2,8	1,6	2,7	130	76	Средний	Дефект смазки
	t2	7,1	1,9	1,9	2,1	130	70	Слабый	Износ тел качения и сепаратора
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Насос	t3	7,1	4,0	2,4	2,1	130	75	Слабый	Бой рабочего колеса
4 эксперимент									
Электродвигатель	t1	7,1	4,2	2,4	3,0	130	79	Средний	Дефект смазки
	t2	7,1	2,2	2,2	2,5	130	72	Слабый	Износ тел качения и сепаратора
Насос	t3	7,1	4,2	2,6	2,7	130	78	Слабый	Бой рабочего колеса
5 эксперимент									
Электродвигатель	t1	7,1	7,4	5,6	4,2	130	90	Сильный	Дефект питающей сети
	t2	7,1	7,0	4,8	4,5	130	90	Сильный	Дефект питающей сети
Насос	t3	7,1	4,0	3,3	3,2	130	56		

ПДЗ\* – предельно-допустимое значение

К слабым дефектам подшипников относят те, которые практически не влияют на результаты прогноза их безаварийной работы, поскольку могут изменяться: расти или уменьшаться в процессе эксплуатации и при обслуживании. К средним относят дефекты, которые не приводят к отказам подшипников за время, существенно превышающее длительность прогноза безаварийной работы подшипника. Они учитываются в результатах прогноза только при обнаружении нескольких одновременно развивающихся дефектов. Сильные дефекты реально влияют на остаточный ресурс подшипника, поэтому уточнение вида сильного дефекта позволяет существенно снизить количество преждевременно заменяемых подшипников.

В ходе выполнения диагностических испытаний электродвигателя были получены данные, представленные в таблице 3.

Диапазон изменения значения виброскорости составил от 1,6 до 4,4 мм/с для вертикального, 1,5 – 4,2 мм/с для поперечного и 1,5 – 2,7 мм/с для осевого направления.

Таким образом, рассмотрена возможность обнаружения механических и электрических дефектов на основе метода спектрального анализа. Проведена серия экспериментов с использованием описанного метода. На основании приведенных данных возможен дальнейший анализ выборки с целью разбраковки асинхронных двигателей.

### Литература

1. *Абрамов И.Л.* Вибродиагностика энергетического оборудования: учеб. пособие / И.Л. Абрамов. Кемерово: Изд. ИУУ СО РАН, 2010. 80 с.
2. *Андрюченко Л.А.* Вибродиагностика механизмов: учебно-методическое пособие / Л.А. Андрюченко, П.А. Ларюшкин, В.В. Лычагин, С.А. Поляков. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 24 с.
3. *Бобров В.В.* Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей / В.В. Бобров // Ползуновский вестник. 2012. № 3/1. С. 198–203.
4. *Ефремова Т.А.* Особенности спектрального анализа для исследования электрических дефектов асинхронных электродвигателей / Т.А. Ефремова, Ю.Р. Моисеева // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий. Сб. трудов V межд. научно-практ. конф. М.: НИЯУ МИФИ. Балаково, 2019. С. 218–222.
5. *Ефремова Т.А.* Методы диагностики электрических дефектов асинхронных двигателей / Т.А. Ефремова, Ю.Р. Моисеева // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании // Сб. трудов I межд. научно-практ. конф. М.: НИЯУ МИФИ. Балаково, 2019. С. 229–233.
6. *Колобов А.Б.* Вибродиагностика: теория и практика: учеб. пособие / А. Б. Колобов. Вологда: Инфра-инженерия, 2019. 252 с.