

## ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОЛНОВЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

А. А. Грибанов

*В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований изменения спектрального состава волновых затухающих колебаний в обмотках асинхронного двигателя при изменении технического состояния его подвижных частей. Разработана методика диагностики подвижных частей асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, диагностика, волновые затухающие колебания, эксцентриситет, спектральный анализ*

Современная архитектура городов базируется на использовании высотных зданий. По действующим нормативам все здания высотой более 5 этажей, а в ряде случаев и общественные здания меньшей этажности, должны оборудоваться лифтами.

Для обеспечения функции подъёма и опускания людей и грузов в лифтовых машинах наибольшее распространение получили двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором 4АН160 и 4АН180. При этом практика эксплуатации этих электродвигателей показывает, что способность ими выполнять заданные функции определяется, в том числе, и состоянием их подвижных частей. Так, обрыв стержня ротора, не позволяющий развивать мощность даже при недогрузке, занимает существенную долю среди общего числа отказов. Поэтому актуальной является проблема своевременного установления развивающихся дефектов подвижных элементов электродвигателя.

В настоящее время разработан ряд методов функциональной диагностики, спецификой которых является получение информации о состоянии именно подвижных частей электродвигателя [1–3]. Их основным недостатком является дороговизна. К тому же получение диагностической информации возможно только во время работы оборудования. Лифты же работают в повторно-кратковременном режиме с изменяющейся нагрузкой, что затрудняет диагностику по этим методам. Поскольку паузы в работе электродвигателя на загрузку, выгрузку и простои в ожидании занимают значительное время в общей продолжительности эксплуатации лифта, то для оценки технического состояния целесообразно использовать тестовые

методы, отличающиеся малым временем цикла преобразования тестовой информации в диагностическую. Одним из таких методов является метод волновых затухающих колебаний (ВЗК), который описывался в ряде работ [4–6].

Изначально метод ВЗК разрабатывался для диагностики электроизоляционных систем электрических машин. Он успешно используется как при диагностике электродвигателей, так и силовых трансформаторов [7]. Однако вопрос о возможности использования этого метода для оценки состояния и поиска дефектов подвижных частей в настоящей статье рассматривается впервые.

Поскольку установить взаимосвязь между характеристиками дефектов и значениями диагностических параметров теоретическим путём затруднительно, то для решения описанной научной задачи был проведен комплекс экспериментальных исследований, в основу которого положена гипотеза о том, что спектральный состав диагностического сигнала зависит от дефектов механической части. Цель экспериментальных исследований – установить наличие или отсутствие этой зависимости.

Поскольку число пазов на статоре и роторе фиксировано, и обмотка статора намотана определённым образом, было выдвинуто предположение о том, что параметры магнитной цепи при различных положениях ротора будут отличаться, а это вызовет изменение спектрального состава диагностического сигнала при различных положениях ротора. Кроме того, логично предположить, что диагностические признаки дефектов могут проявиться только в определённых положениях ротора. Поэтому в основу эксперимен-

тов положена регистрация спектрограмм при различных положениях ротора. Для обеспечения приемлемой точности было решено фиксировать спектрограммы через каждые 10 градусов. То есть на один полный оборот ротора пришлось 36 измерений.

Анализ наиболее распространённых причин отказов электродвигателей, связанных с подвижными частями, показал необходимость определения следующих неисправностей:

- эксцентриситет ротора, вызванный повреждением переднего подшипника;
- эксцентриситет ротора, вызванный повреждением заднего подшипника;
- обрыв стержня ротора.

Поэтому было решено фиксировать прохождение диагностического сигнала по обмоткам обоих скоростей двигателя в прямом и обратном направлениях при 36 положениях ротора для исправного состояния электродвигателя, для неисправного переднего подшипника, для неисправного заднего подшипника и при повреждённом роторе.

Базовыми значениями тестового сигнала выбраны частота 2 кГц, скважность импульсов – 2, а амплитуда – 1 В. Выбранное значение частоты и скважности объясняется тем, что пробные эксперименты показали сопоставимость длительности полупериода сигнала с длительностью волнового затухающего колебательного процесса (250 мкс). Этим обеспечивается повышение информативности диагностического сигнала.

USB-осциллограф АК ИП-4107/3 позволяет получать спектрограммы исследуемого сигнала в различных диапазонах спектра. Поэтому на первом этапе встал вопрос о том, в каком диапазоне частот наиболее эффективно проводить сопоставление спектрограмм для оценки технического состояния подвижных частей электродвигателя. Часть полученных спектрограмм с различными диапазонами значений приведена на рисунке 1.

Сравнивая спектрограммы, приведённые на рисунке 1, можно сделать вывод о том, что характер их повторяется. При этом, чем меньше диапазон частот, тем более выраженными являются максимумы амплитуд, кратные 8 кГц (это четырёхкратная частота тестирующего сигнала) начиная с 4 кГц. Остальные частоты выражены в спектре меньше, но могут образовывать локальные максимумы, что хорошо видно на спектрограммах, построенных в диапазонах малых частот.

В ходе экспериментальных исследований было обнаружено явление изменения характеристик спектрального состава сигнала во времени. Поскольку данное явление сложное и установить его причины и характеристики в короткие сроки не удалось, то было решено провести анализ и обработку собранного экспериментального материала и выявить наиболее приемлемый диапазон частот для анализа, в котором изменение спектрального состава во времени минимально. Проведённый анализ показал, что максимальной частотой, при которой спектр изменяется минимально, является 100 кГц.

Поскольку принято решение о необходимости фиксации спектрограмм через каждые 10 градусов, то возникла задача о необходимости точного измерения углов. Для решения этой задачи на двигатель была нанесена шкала. Указатель был смонтирован на роторе таким образом, что стрелка располагалась посередине проточки на конце вала под шпонку. Положения ротора устанавливались вручную.

В результате экспериментов установлено, что спектрограммы для различных положений ротора имеют отличия.

Обработка полученных данных позволила сформировать базу спектрограмм для условно идеального состояния двигателя 4АН160, которые в дальнейшем для удобства будем называть спектонормограммами.

Неисправность подшипника моделировалась путём извлечения части шариков из шарикоподшипника. Для получения спектрограмм для критического состояния подшипников неисправный подшипник сначала устанавливался со стороны редуктора (передний), а второй подшипник со стороны вентилятора (задний) оставался исправным.

Сопоставление спектрограмм для этого случая со спектонормограммами показало, что в спектре появились существенные отличия. В первую очередь это касается окрестностей пиков, в которых заметны снижения значений амплитуд составляющих спектра при повреждении подшипника.

Также повреждённый подшипник устанавливался со стороны вентилятора (стал задним), а исправный подшипник устанавливался со стороны редуктора (стал передним). В результате анализа спектрограмм установлено, что амплитуды частот уменьшились в этом случае гораздо больше, чем в предыдущем, особенно в окрестностях пиков 4, 12, 20, 44 и 92 кГц.

## ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОЛНОВЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

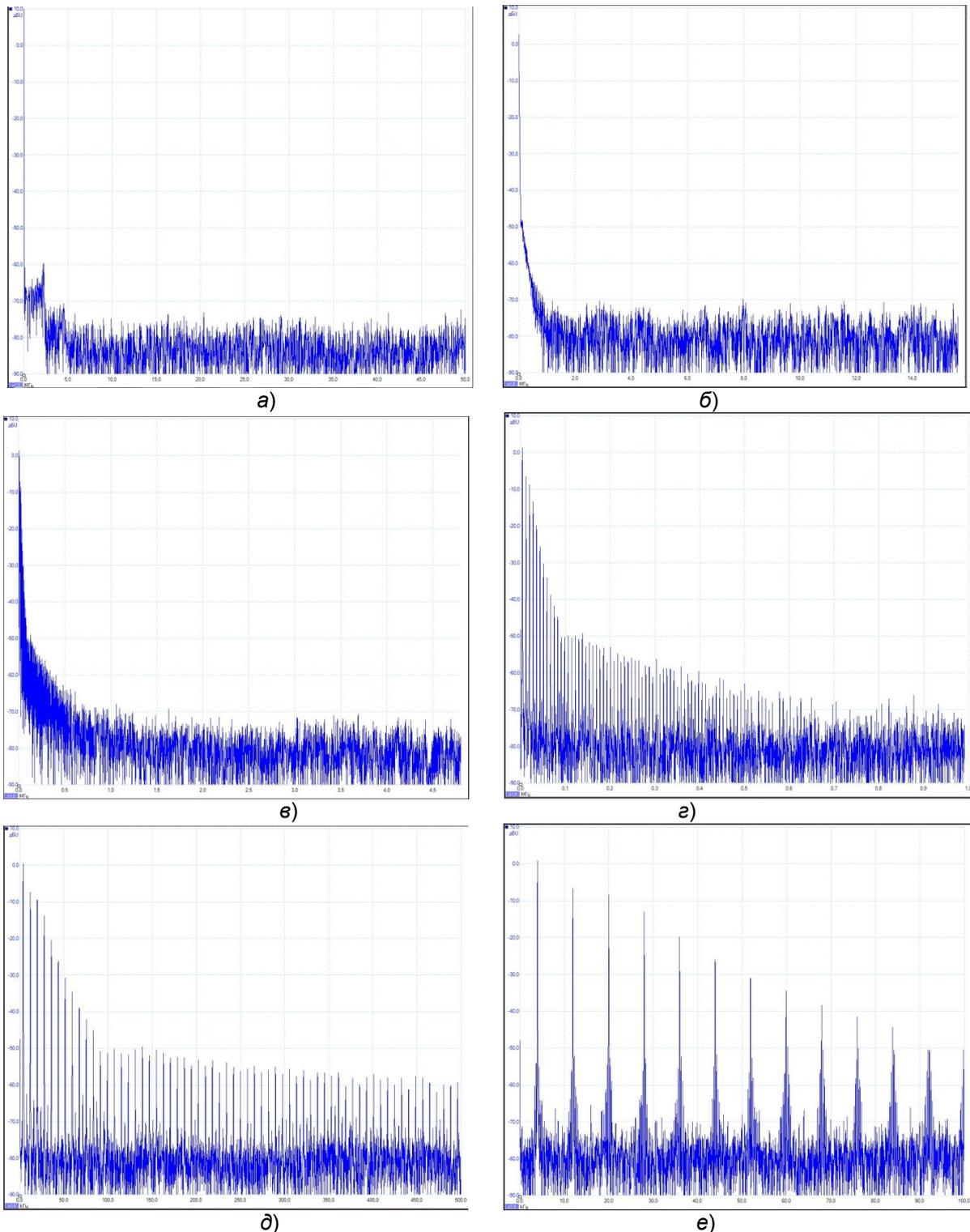


Рисунок 1 – Основные формы спектрограмм в различных диапазонах частот:  
а – 0–50 МГц; б – 0–16 МГц; в – 0–5 МГц; г – 0–1 МГц; д – 0–500 кГц; е – 0–100 кГц

Обрыв стержней ротора моделировался с помощью умышленного повреждения стержней ротора механическим способом.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4-2 2013

В результате был обеспечен обрыв одного стержня в положении ротора 0°.

Так же, как и в предыдущих случаях, производилась фиксация спектрограмм для всех оговоренных положений ротора. Анализ спектров показал, что уменьшились амплитуды частот в окрестностях пиков. В то же время специфической особенностью спектра при повреждении ротора является появление локальных пиков для частот, кратных 4 кГц.

Прямое сопоставление спектров позволяет сделать вывод об ухудшении состояния подвижных частей. Однако для достижения большей практической значимости полученных результатов исследований требуется разработка методики диагностики, которая позволила бы делать однозначный вывод о характере повреждения или развивающегося дефекта.

Основным способом получения диагностических частот спектрального состава является сопоставление спектрограмм, соответствующих условно идеальному состоянию и состоянию при наличии дефектов. Данная задача является трудоёмкой, в связи с чем будем использовать автоматизированную обработку с использованием вычислительной техники. В основу анализа положено отношение значения амплитуды при наличии повреждения к значению, зафиксированному в исправном состоянии. Для того, чтобы учесть именно величину изменения из полученного значения вычтена единица:

$$K_{ij} = \frac{A_{ij,повр}}{A_{ij,испр}} - 1, \quad (1)$$

где  $K_{ij}$  – базисный диагностический коэффициент, о.е.;

$A_{ij,повр}$  – значение амплитуды для  $i$ -го угла положения ротора и  $j$ -й частоты при наличии повреждения;

$A_{ij,испр}$  – значение амплитуды для  $i$ -го угла положения ротора и  $j$ -й частоты для условно идеального состояния двигателя.

Сравнение спектрограмм и спектронограмм показало, что наибольшие отклонения спектрограммы имеют при частоте 3979 Гц. Для этой частоты построены лепестковые диаграммы, приведённые на рисунках 2–5.

На рисунке 2 приведена лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы для условно идеального состояния и для анализируемых видов повреждений подвижных частей электродвигателя. Для удобства анализа будем рассматривать попарные сочетания диаграмм для условно идеального состояния и для одного из видов повреждения.

На рисунке 3 приведена лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы условно идеального состояния и повреждения переднего подшипника для частоты 3979 Гц. Диаграмма для условно идеального состояния имеет ярко выраженный колебательный характер. Анализируя внешний вид диаграмм можно заключить, что средние значения амплитуд примерно равны, но анализируемые колебания находятся в противофазе друг к другу. К тому же у диаграммы повреждения переднего подшипника наблюдается участок роста без колебаний от 350 до 50 градусов и спада от 50 до 90 градусов. Эти два участка в сочетании с колебаниями в противофазе являются определяющими для данного вида повреждения.

На рисунке 4 приведена лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы условно идеального состояния и повреждения заднего подшипника для частоты 3979 Гц. Диаграмма для повреждения заднего подшипника характеризуется такими же колебаниями амплитуд, как и для условно идеального состояния. Фазы колебаний совпадают. Однако колебания амплитуд для повреждения заднего подшипника имеют больший размах. Характерным для данного вида повреждения является наличие «короны» в диапазоне от 270 до 10 градусов.

На рисунке 5 приведена лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы условно идеального состояния и повреждения ротора для частоты 3979 Гц. Анализируя диаграмму можно заметить, что кривая повреждения ротора имеет колебания в противофазе по отношению к диаграмме для условно идеального состояния двигателя. При этом меньшие значения диаграммы рассматриваемого повреждения в большинстве случаев совпадают с наибольшими значениями диаграммы для условно идеального состояния. Колебания амплитуд диаграммы повреждения имеют большой размах.

На следующем этапе выявлялись частоты, у которых имеются существенные отклонения базисного диагностического коэффициента  $K_{ij}$ . Для этого для каждого вида повреждения отбирались диагностические частоты и положения угла ротора, при которых значения коэффициента  $K_{ij}$  по модулю составляли более 0,25. Полученное число диагностических частот из общего числа (4096) оказалось велико. Поэтому было принято решение оставить для рассмотрения только те частоты, у которых количество базисных диагностических коэффициентов со значением по модулю более 0,25 не менее 4.

ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОЛНОВЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

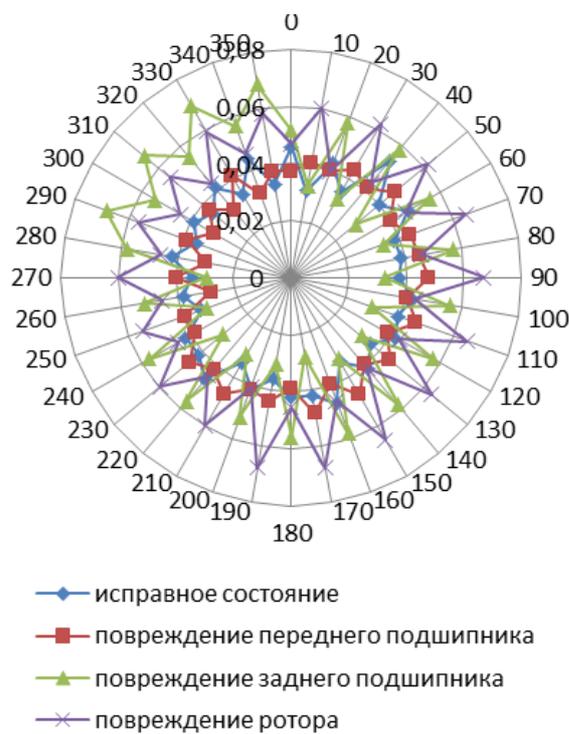


Рисунок 2 – Лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы для различных состояний подвижных частей для частоты 3979 Гц

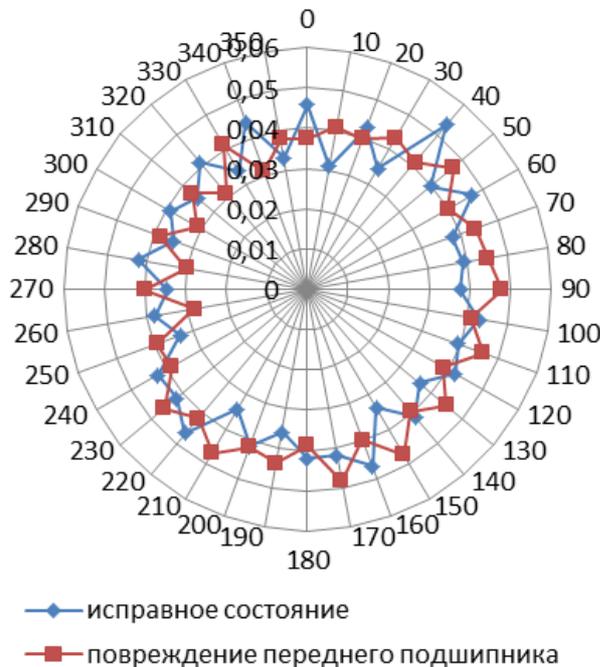


Рисунок 3 – Лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы для исправного состояния и повреждения переднего подшипника для частоты 3979 Гц

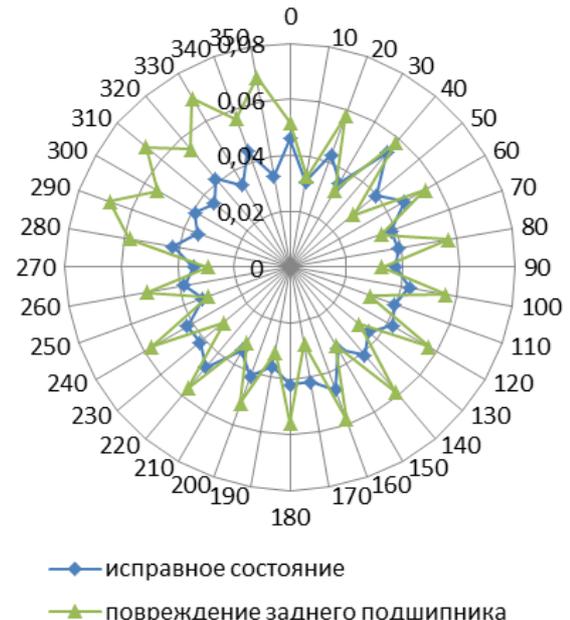


Рисунок 4 – Лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы для исправного состояния и повреждения заднего подшипника для частоты 3979 Гц

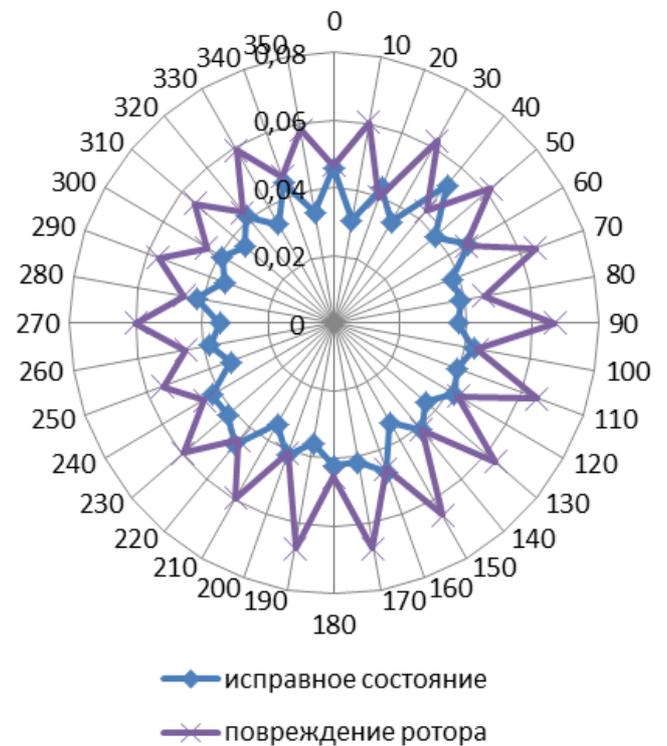


Рисунок 5 – Лепестковая диаграмма амплитуд спектрограммы для исправного состояния и повреждения ротора для частоты 3979 Гц

Таким образом, для диагностики повреждения переднего подшипника получено 11 частот, одна из которых имеет 8 характерных точек (положений ротора), одна частота – пять характерных точек и остальные девять частот – четыре характерные точки. Для диагностики повреждения заднего подшипника получено 13 частот, одна из которых имеет 20 характерных точек (положений ротора), а остальные – четыре характерные точки. Для диагностики повреждения ротора получено 20 частот, одна из которых имеет 18 характерных точек (положений ротора), одна частота – пять характерных точек и остальные восемнадцать частот – четыре характерные точки.

Сравнение частот, отнесённых к диагностическим для каждого вида повреждений, позволило сделать вывод о том, что общей для всех видов повреждений является частота 3979 Гц. Эту частоту примем за базовую при диагностике подвижных частей. Совпадение отмечено также и в отношении частоты 95825 Гц, которая входит в перечень диагностических частот для повреждения заднего подшипника и ротора.

Методику диагностики состояния механической части асинхронного двигателя будем создавать на основе существующих подходов к оценке значений диагностических параметров. Поскольку в ходе диагностирования исследуется спектральный состав, то диагностическими параметрами будут являться амплитудные значения отдельных частот спектра.

В практике диагностики известны три основных подхода к обеспечению сравнимости текущего измеренного значения диагностического параметра [8]:

- текущее значение сопоставляется со значением диагностического параметра, соответствующим идеальному состоянию;
- текущее значение сопоставляется со значением диагностического параметра, соответствующим критическому состоянию (перед выходом из строя);
- текущее значение сопоставляется со значением диагностического параметра, полученным во время предыдущей диагностики.

Применительно к нашему случаю наиболее подходящим является сопоставление текущих значений отдельных составляющих спектра со значением этих составляющих для условно идеального состояния электродвигателя. В экспериментальных исследованиях база спектрограмм для этого состояния получена в полном объёме. В дальнейшем по от-

ношению к этой базе будем использовать термин спекторнограмма.

Методика диагностики подвижных частей асинхронных электродвигателей состоит в следующем:

- перед вводом в эксплуатацию у нового двигателя или поступившего из ремонта снимается спекторнограмма;
- после монтажа производится сопоставление спекторнограммы с положениями штурвала, которое фиксируется в базе данных;
- во время диагностики по графику штурвал устанавливается в начальное положение, которое зафиксировано в базе данных;
- на один из контактов в магнитном пускателе подаётся прямоугольный тестирующий импульс, а с другого контакта снимается диагностический сигнал для всех положений ротора;
- полученные осциллограммы преобразуются в спектрограммы;
- на всех спектрограммах выделяются значения, соответствующее частоте 3979 Гц и делятся на значения спекторнограммы для получения базисного диагностического коэффициента, который будет иметь вид

$$K_{ij} = \frac{A_{ij.текущ}}{A_{ij.эталон}} - 1, \quad (2)$$

где  $A_{ij.текущ}$  – текущее значение амплитуды для  $i$ -го угла положения ротора и  $j$ -й частоты;

$A_{ij.эталон}$  – эталонное значение амплитуды для  $i$ -го угла положения ротора и  $j$ -й частоты;

– если значение базисного диагностического коэффициента составляет менее 20 % значений, приведённых в диагностических таблицах для частоты 3979 Гц, то двигатель считается находящимся в удовлетворительном состоянии;

– если значение базисного диагностического коэффициента составляет 20 % и более, то требуется проверка на всех диагностических частотах, приведённых в диагностических таблицах, по результатам чего принимается решение о необходимости замены подшипников или ротора.

Разработанная методика диагностики подвижных частей асинхронного электродвигателя на основе использования метода ВЗК, несмотря на некоторую сложность реализации, расширяет диагностические возможности метода ВЗК и создаёт основу для создания универсального метода диагностики асинхронных двигателей, который бы позво-

## ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОЛНОВЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

лил судить о техническом состоянии всех его элементов. Решение этой задачи позволит повысить качество управления надёжностью асинхронных электродвигателей, задействованных в системах электропривода в технологических процессах и механизмах с повышенными требованиями безопасности и высокими значениями ущербов при перерывах функционирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогачев, В. А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук. : 05.09.01 / В. А. Рогачев. – Новочеркасск, 2008. – 173 с. : ил.
2. Чернов, Д. В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы [Текст] : Дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / Д. В. Чернов. – Ульяновск, 2005. – 129 с.
3. Бобров, В. В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей [Текст] / В. В. Бобров // Ползуновский вестник. – № 3/1. – 2012. – С. 198–203.
4. Сташко, В. И. Диагностика изоляции электродвигателей в сельском хозяйстве на основе использования метода затухающих колебаний в обмотке [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук / В. И. Сташко. – Барнаул, 1998. – 134 с.
5. Хомутов, О. И. Эксплуатация, диагностика и восстановление низковольтных асинхронных электродвигателей : учебное пособие по курсу «Монтаж и эксплуатация систем электроснабжения промышленных предприятий» для студентов специальности 10.04 – «Электроснабжение» (по отраслям) всех форм обучения [Текст] / О. И. Хомутов, А. А. Грибанов // Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – 110 с.: ил.

6. Хомутов, О. И. Электрические и акустические методы диагностики электрических машин [Текст] / О. И. Хомутов, Г. В. Суханкин, Н. Т. Герцен, В. И. Сташко. – Новосибирск : Наука, 2007. – 209 с.

7. Грибанов, А. А. Математическое моделирование диагностического сигнала при оценке состояния силовых трансформаторов по методу низковольтных импульсов [Текст] / А. А. Грибанов, С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – № 2. – 2010. – С. 232–238.

8. Хомутов, С. О. Повышение надёжности работы асинхронных двигателей путем разработки методики и технических средств для определения эталонных значений диагностического параметра их изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – № 1. – 2002. – С. 26–32.

**Грибанов А. А., к.т.н., доцент, E-mail: [diread@mail.ru](mailto:diread@mail.ru), Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», +7(385-2)29-07-76.**