

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

УДК 621.316.925

На правах рукописи

КРЮКОВА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА

**Совершенствование методов диагностики эксцентриситета ротора
асинхронных двигателей**

Специальность - 6D071800 —Электроэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Отечественный научный консультант
Д.т.н., профессор Новожилов А. Н.

Зарубежный научный консультант
Д.т.н., профессор Горюнов В. Н.

Павлодар, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	3
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	10
1.1 Конструктивные особенности и эксцентриситет ротора.....	10
1.2 Токи в обмотках при эксцентриситете ротора.....	13
1.3 Ущерб от эксцентриситета ротора	18
1.4 Методы диагностики по электрическим параметрам.....	20
1.5 Методы диагностики по электромагнитным параметрам.....	25
1.6 Выводы.....	29
2 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОБ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЕ РОТОРА.....	31
2.1 Методы спектрального анализа сигналов.....	31
2.2 Диагностические признаки повреждения.....	36
2.3 Причины погрешностей измерения	40
2.4 Выводы.....	44
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОБ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЕ РОТОРА.....	46
3.1 Метод искусственных нейронных сетей.....	46
3.2 Метод математического критерия в виде действующего значения дополнительного тока	51
3.3 Метод оконного преобразования Фурье.....	54
3.4 Оконное преобразование Фурье с «адаптирующимся» окном.....	60
3.5 Выводы.....	63
4 СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА СО ВСТРОЕННОЙ ЗВУКОВОЙ КАРТОЙ	64
4.1 Особенности использования звуковой карты в качестве аналого-цифрового преобразователя.....	64
4.2 Особенности построения системы диагностики.....	70
4.3 Программное обеспечение.....	73
4.4 Практическая реализация системы.....	77
4.5 Выводы.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	83
ПРИЛОЖЕНИЯ	91

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 54149—2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Асинхронный двигатель - устройство, преобразующее энергию переменного тока в механическую энергию;

Статический эксцентриситет ротора – эксцентриситет, обусловленный смещением оси вращения ротора относительно оси расточки статора;

Спектральный анализ - один из методов обработки сигналов, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала;

Аттенюация сигнала – ослабление уровня звукового сигнала;

Частота дискретизации - частота взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала при его записи в дискретном виде.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В диссертации использованы традиционные для электротехнической литературы единицы измерения: А, В, Ом, Гц, мкВ, кОм, мм, об/мин, ед., дБ.

АД	- асинхронный двигатель
ЭДС	- электродвижущая сила
СНГ	- содружество независимых государств
МДС	- магнитодвижущая сила
АЦП	- аналого-цифровой преобразователь
ЗК	- звуковая карта
ПК	- персональный компьютер
КРУ	- комплектное распределительное устройство
ИП	- индукционный преобразователь
БПФ	- быстрое преобразование Фурье
ИНС	- искусственная нейронная сеть
НУ	- нормирующее устройство
БОС	- блок обработки сигнала
БУ	- блок управления
БХИ	- блок хранения информации
БОИ	- блок обработки информации
БОВЭ	- блок определения величины эксцентриситета

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Самым многочисленным классом электрических машин переменного тока в электроэнергетике и промышленном производстве являются асинхронные двигатели (АД). Их в странах СНГ в настоящее время находится в эксплуатации не менее 6-8 миллионов. Как показывает практика эксплуатации АД, около половины из них длительное время работают со статическим эксцентриситетом ротора. Если смещение ротора меньше 80% воздушного зазора, то такая эксплуатация обычно не приводит к немедленному выходу АД из строя, но сопровождается значительным ухудшением его эксплуатационных характеристик. В частности перерасходом электроэнергии на 0,5-1,5% [1]. При этом стоимость потерь электроэнергии за год эксплуатации соизмерима со стоимостью самого двигателя.

Если при эксцентриситете ротор задевает за статор, то происходит резкий разогрев их сердечников и «зализ» поверхностей со стороны воздушного зазора. В результате в статоре выгорают пазовые клинья, происходит ускоренное старение изоляции обмотки, которое, как правило, сопровождается однофазным ее замыканием на землю или междуфазным коротким замыканием. При этом литая обмотка ротора расплавляется, а паянная распаивается. Большая часть этих повреждений приводит к дорогостоящему ремонту или полному выходу АД из строя. Своевременное диагностирование эксцентриситета ротора без остановки АД позволяет ограничиться только заменой подшипников или регулировкой воздушного зазора.

Чаще всего в качестве диагностического признака эксцентриситета ротора в диагностических системах используют одну из составляющих дополнительного тока фазы статора АД. Однако какую из этих составляющих использовать в качестве диагностического признака эксцентриситета ротора и как её выделять в различных диагностических системах решается по-разному. В тоже время, как показывают многочисленные эксперименты на АД различных типов, величины этих составляющих дополнительного тока при фиксированном значении эксцентриситета не постоянны во времени, а увеличение эксцентриситета не всегда сопровождается их ростом. Все это вызвано колебанием частоты и напряжения сети, вибрациями АД, неравномерностью момента сопротивления его нагрузки, а также особенностями метода обработки получаемого сигнала.

Именно этим и определено отсутствие простого и надежного способа получения и обработки информации для выявления наличия эксцентриситета ротора в АД при неявно изменяющихся параметрах диагностических признаков. Таким образом, вопрос совершенствования методов диагностики эксцентриситета ротора АД является актуальным.

Целью работы является совершенствование методов диагностики эксцентриситета ротора асинхронных двигателей путем разработки новых способов выделения диагностических признаков эксцентриситета и надежного выявления самого повреждения при неявно изменяющихся параметрах этих диагностических признаков.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнить анализ существующих способов получения информации об эксцентриситете ротора и обработки сигнала с целью выделения диагностических признаков этого повреждения, с выбором наиболее удобного и эффективного из них, разработка рекомендаций по его использованию;
- обосновать использование в качестве измеряемого параметра тока статора, а в качестве диагностического признака – составляющие его дополнительного тока;
- выявить причины погрешностей измерения составляющих дополнительного тока статора;
- разработать способ распознавания наличия и величины эксцентриситета, в котором в качестве источника информации используются составляющие его дополнительного тока;
- разработать метод обработки измеряемого сигнала, который позволяет с достаточной для диагностики точностью выделять гармоники и составляющие дополнительного тока при значительных изменениях частоты измеряемого сигнала;
- исследовать возможность использования в качестве АЦП встроенных звуковых карт персонального компьютера;
- с учетом недостатков существующих систем, разработать новую технологическую схему системы диагностики эксцентриситета ротора;
- для новой системы диагностики эксцентриситета ротора разработать алгоритм работы и программное обеспечение на основе объектно-ориентированной среды программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise;
- для исследования процессов в АД при эксцентриситете ротора и различных методов обработки сигналов разработать программное обеспечение для ПК, позволяющее получать осциллограммы тока статора АД и исследовать полученные сигналы, выбранными в процессе исследования методами;
- проработать необходимые вопросы практической реализации системы диагностики эксцентриситета ротора АД включающие ее настройку, подключение при диагностике и непосредственно диагностирование.

Объектом исследования является область диагностирования повреждений эксцентриситета ротора АД собственных нужд электрических станций посвященная разработке и исследованию новых, чувствительных и недорогих систем диагностики эксцентриситета ротора на основе усовершенствованных методов цифровой обработки сигналов. Это позволит осуществлять диагностику этого повреждения при неявно изменяющихся параметрах диагностических признаков.

Предмет исследования – совершенствование методов диагностики эксцентриситета ротора АД собственных нужд электрической станции путем разработки методов диагностики и обработки информационного сигнала, позволяющих учесть его нестационарность.

Инструментом в получении материалов исследования являются:

- фундаментальные положения математики в области гармонического анализа;

- фундаментальные положения теории релейной защиты и диагностики;
- фундаментальные положения теории электрических машин;
- теоретические основы электротехники;
- фундаментальные положения цифровой обработки сигналов и систем искусственного интеллекта;
- физическое моделирование и метод натурного эксперимента;
- объектно-ориентированное программирование.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Исследованы причины ограничивающие чувствительность систем диагностики эксцентриситета ротора и их влияние на чувствительность;
2. Разработан метод коррекции составляющих информационного сигнала при колебании величины напряжения питающей сети;
3. Разработан метод оконного преобразования Фурье с адаптирующимся окном, позволяющий осуществлять диагностику эксцентриситета ротора при колебании частоты напряжения питающей сети;
4. Развита теория построения систем диагностики эксцентриситета ротора в случае неявно изменяющихся диагностических признаков повреждения;
5. Предложены способы распознавания наличия и величины эксцентриситета ротора на основе применения искусственной нейронной сети и по действующему значению дополнительного тока;
6. Обоснован метод определения величины эксцентриситета ротора АД и критериев диагностики по величине его технологического эксцентриситета.
7. С целью повышения чувствительности системы диагностики эксцентриситета ротора предложено осуществлять диагностирование АД в режимах «Настройка» и «Диагностика».

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Выявлено, что основными причинами, ограничивающими чувствительность систем диагностики эксцентриситета ротора АД, являются колебания напряжения и частоты сети, а также вибрации АД и приводного механизма, неравномерность момента сопротивления его нагрузки. От последних, в значительной мере, легко избавиться, осуществляя диагностику в режиме холостого хода;
2. Разработанный метод коррекции составляющих информационного сигнала позволяет достаточно точно осуществлять ее при колебании величины напряжения питающей сети и ее гармонического состава в пределах предусмотренных ГОСТ Р 54149 — 2010;
3. Разработанный метод оконного преобразования Фурье с адаптирующимся окном, позволяет осуществлять диагностику эксцентриситета ротора при колебании частоты напряжения питающей сети в рамках предусмотренных ГОСТ Р 54149 — 2010;
4. Предложенные способы определения наличия и величины эксцентриситета ротора на основе применения искусственной нейронной сети и действующего значения дополнительного тока позволяют определять его с достаточной для диагностики АД точностью;

5. Предложенный метод определения критериев диагностики эксцентриситета ротора по величине его технологического эксцентриситета позволяет достаточно точно определить возможность дальнейшей эксплуатации АД.

6. Разработана технологическая схема системы диагностики эксцентриситета ротора с учетом неявно изменяющихся диагностических признаков повреждения на основе теоретически обоснованных и подтвержденных экспериментальным путем рекомендаций и требований к системам диагностики;

7. Разработано программное обеспечение «Елена-2014», позволяющее обеспечить экспериментальную поддержку теоретических исследований по совершенствованию методов диагностики эксцентриситета ротора.

Апробация результатов исследования - основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 14-ой Международной конференции "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты" (г.Алушта, Крым) в 2012 году, на V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!», проводимой в г. Омске (Россия) в 2013 году, на XXVII международной научно-практической конференции «Технические науки — от теории к практике» в г. Новосибирске (Россия) в 2013 году, а также на 2-ой "Европейской конференции по инновациям в технических и естественных науках", (г. Вена, Австрия) в 2014 году. По работе опубликовано 8 статей, в том числе 3 в журналах, входящих в базу цитирования Scopus, в журналах рекомендованных ВАК РК – четыре, одна статья в журнале «Электромеханика» (Россия), а также получено положительное заключение на получение патента на изобретение.

1 ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1.1 Конструктивные особенности и эксцентриситет ротора

Асинхронные двигатели (АД) широко используются в качестве электропривода основных механизмов в электроэнергетике и промышленном производстве. Ориентировочно они потребляют до $80 \div 85\%$ всей вырабатываемой электроэнергии. Широкое применение АД объясняется тем, что они просты в изготовлении и эксплуатации, а также обладают высокой надежностью и экономичностью. Электротехническая промышленность стран СНГ выпускает в год миллионы АД для всех отраслей промышленности [1-5]. Поэтому в этих странах в настоящее время эксплуатируется 6-8 миллионов АД.

Преобразование электрической энергии в механическую [3-5] в АД производится с помощью электромагнитных полей. Эти поля возбуждаются токами в проводниках обмоток статора и ротора. Обмотки размещены в пазах магнитопроводов. Магнитопроводы и обмотки принято считать активными частями АД. Всё энергопреобразование машины происходит именно в них. Чтобы обеспечить работу этих активных частей АД требуется много различных конструктивных элементов.

Часть из них предназначена для подвода электрической энергии и отвода механической. Другие фиксируют положение ротора относительно статора. Ряд элементов предназначен для изоляции проводников обмоток статора и ротора между собой и от магнитопроводов. Некоторые из них защищают элементы АД от механических воздействий и воздействий окружающей среды, а также обеспечивают безопасную его эксплуатацию. Известно множество конструкций АД и взаимное расположения этих элементов в нем. Основные подходы в конструировании АД с горизонтальным расположением вала для электроэнергетики представлены на рисунке 1.1 [1-5].

Статор АД в соответствии с рисунком 1.1, состоит из корпуса 1 и магнитопровода 2 с обмоткой 3. Ротор выполнен в виде напрессованного на вал 4 магнитопровода 5 с короткозамкнутой обмоткой 6. Охлаждение машины обеспечивает вентиляторы 7 и 8. Внешний вентилятор 8 закрыт кожухом 9, который направляет воздух на ребра охлаждения 10. Ротор относительно статора в сборе фиксируется с помощью подшипников 11 и 12. Подшипники закрепляются на подшипниковых щитах 13 и 14. Передача момента осуществляется через шкив с помощью ремня или соединительную муфту. Питающее напряжение подводится через распределительную коробку 15. Закрепляется двигатель с помощью кронштейнов 16, а его заземление осуществляется с помощью винта 17.

Конструкция корпуса 1 АД зависит от мощности машины, способа монтажа, защиты от внешних воздействий и способа охлаждения. В некоторых АД массового применения до 500 кВт корпус выполняется литым из алюминиевого сплава, в других - литым из чугуна. Детали корпуса более мощных машин изготавливают из металлопроката, а затем сваривают. Кроме того, в корпус вваривают ряд дополнительных элементов, которые

обеспечивают крепление активных частей, бандажных колец, кронштейнов крепления двигателя и другое.

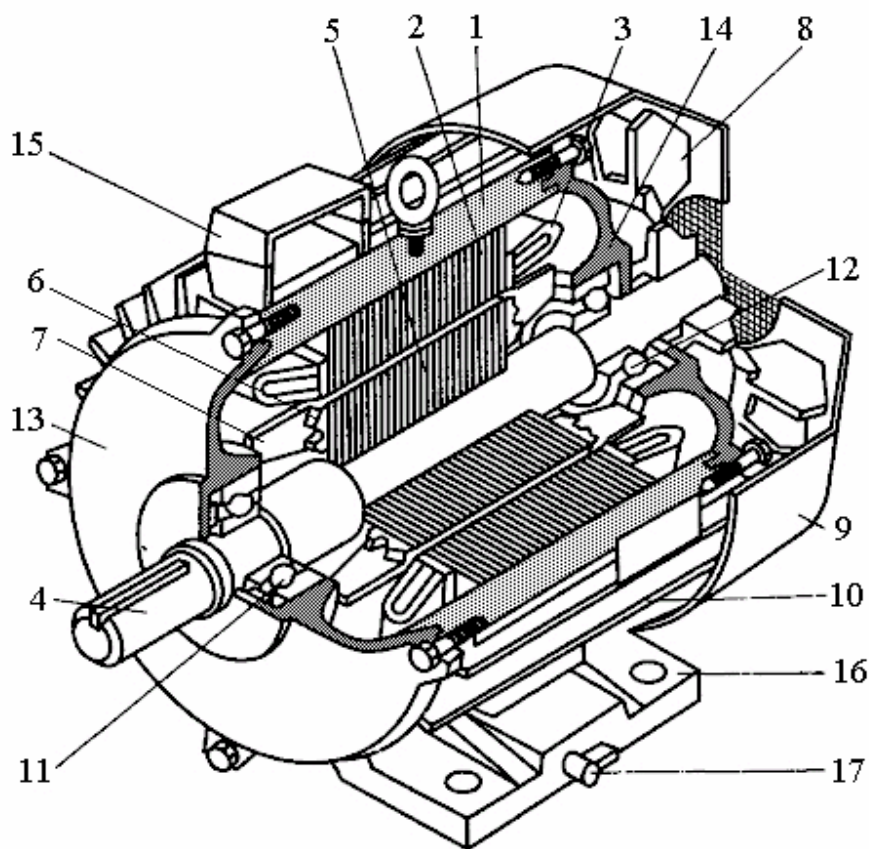


Рисунок 1.1 - Основные элементы конструкции АД

Магнитопровод 2 статора выполняют шихтованным. Он имеет форму полого цилиндра. На внутренней его поверхности вдоль оси вращения располагаются пазы. В них размещают обмотку. Ее тип выбирают в соответствии с формой паза. В мощных АД сердечник делят на пакеты. Между пакетами, с помощью дистанционных прокладок, формируются вентиляционные каналы.

Обмотка 3 статора АД коммутируется из отдельных катушек. Они бывают однослойными и двухслойными, а также всыпными или секционированными. Катушки всыпной обмотки изготавливаются из круглого провода и могут быть по размеру одинаковыми и разными. Катушки секционированной обмотки выполняют из проводников прямоугольного сечения. Все секции одинаковы. Лобовая часть секции представляет собой консоль. Для предотвращения ее изгиба и излома в особо тяжелых режимах работы АД применяют бандажные кольца.

Магнитопровод 5 ротора шихтуют из цельных вырубков. Вырубки получают из листов электротехнической стали толщиной $0,35 \div 0,5$ мм. Пазы для обмотки ротора расположены вдоль или под небольшим углом к образующим на наружной стороне цилиндра ротора. Форма пазов зависит от типа обмотки и

электрохимических характеристик АД. В мощных АД магнитопровод ротора, аналогично статору, формируется из пакетов и имеет вентиляционные каналы. Если обмотка ротора литая, то именно она удерживает пластины сердечника в спрессованном состоянии. Если нет, то фиксация пакета осуществляется нажимными кольцами и стяжными пальцами.

Обмотка ротора АД короткозамкнутая. В машинах малой мощности ее льют из алюминиевых сплавов. Форма паза может быть любой. Ее выбирают такой, чтобы обеспечить АД необходимые, наперед заданные пусковые и рабочие характеристики.

В мощных АД "беличью клетку" выполняют из меди или латуни. Форма пазов этих клеток обычно круглая. Иногда, для улучшения пусковых характеристик применяют глубокий прямоугольный паз. Часто применяют двойную "беличью клетку" из круглых стержней. Причем, верхняя клетка выполняется из бронзы или латуни, а нижняя из меди. После укладки стержней в пазы их чеканят. Короткозамыкающие кольца 5 изготавливают из шины прямоугольного сечения. Соединения стержней и колец паяют.

С торцов корпус 1 статора закрывается подшипниковыми 13, 14 или торцевыми щитами, которые преграждают доступ к токоведущим и вращающимся элементам машины. В АД малой мощности щиты служат опорой для подшипников 11,12. Литые щиты имеют гнездо для посадки подшипников. В АД со сварным корпусом подшипник закрепляется на нижней, несущей половине щита при помощи стояка на кронштейне. В машинах малой и средней мощности используются подшипники качения. В мощных АД - устанавливают подшипники скольжения.

Такая форма фиксации вращающихся частей относительно неподвижных в АД позволяет с достаточно высокой точностью обеспечить соосность внешней поверхности магнитопровода ротора и внутренней поверхности магнитопровода статора. Если эти поверхности несоосны, то это явление в технике называют эксцентриситетом ротора [6-15]. Если эксцентриситет ротора не меняется во времени и пространстве, то его называют статическим. Эксцентриситет, допущенный при изготовлении, называют технологическим эксцентриситетом [11,12]. Так, при изготовлении АД на современных производствах и величинах воздушного зазора до 0,3 – 0,5 мм эксцентриситет обычно не превышает 10%. При эксплуатации электродвигателей с выносными опорами величина эксцентриситета определена только квалификацией ремонтного персонала и может достигать при монтаже больших величин.

Статический эксцентриситет в АД может возникнуть и в процессе эксплуатации. В этом случае причиной его появления может оказаться смещение опор или силы внешнего воздействия на вал ротора. Эксцентриситет без смещения опор возникает в нормально изготовленном и без смещения опор установленном роторе под воздействием веса ротора или силы воздействия приводного ремня на шкив [9]. В том и другом случае возникает прогиб вала и, соответственно, эксцентриситет ротора.

Сдвиг ротора может возникнуть за счет смещения одной или обеих опор. Чаще всего в АД возникает эксцентриситет за счет смещения одной из опор, как это показано на рисунке 1.2.

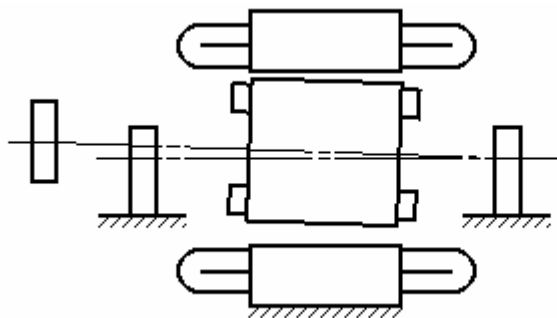


Рисунок 1.2 Эксцентриситет ротора при смещении одной из опор

Эксплуатация АД со статическим эксцентриситетом ротора в пределах воздушного зазора не приводит к немедленному выходу его из строя, но снижает надежность работы, долговечность и другие технико-экономические показатели. Искажение магнитного поля в воздушном зазоре создает одностороннее магнитное притяжение [9], снижает КПД и пусковой момент на 10-13%, растут на 5-6% местные нагревы [13] и вибрация двигателя, а также появляются дополнительные гармонические составляющие. Следует добавить, что одностороннее магнитное притяжение при статическом эксцентриситете ротора неподвижно относительно статора [16,17].

Если при эксцентриситете ротор касается статора, в результате трения происходит сильный разогрев их сердечников, плавление или повреждение «беличьей клетки», быстрое разрушение изоляции обмотки статора с последующим коротким замыканием в ней. Обычно стоимость ремонта двигателя после такого вида повреждения сопоставима со стоимостью самого двигателя. Иногда двигатель после такой аварии проще утилизировать.

1.2 Токи в обмотках при эксцентриситете ротора

Обычно статический эксцентриситет ротора возникает в АД при смещении одной из его опор. Поэтому исследование процессов в АД при статическом эксцентриситете ротора осуществляется с использованием расчетной схемы на рисунке 1.3, где 1 и 2 -сердечники статора и ротора; 3 и 4 -их обмотки; 5 и 6 -первая и вторая опоры. Так как в токах статора и ротора имеется множество гармоник, являющихся результатом нелинейности сердечников, дискретного расположения обмоток и зубчатости воздушного зазора, то полный анализ этих токов представляет собой сложную задачу. Поэтому для упрощения процессы в АД при эксцентриситете ротора рассматриваются только с учетом первой (основной) гармоники тока.

Если пренебречь зубчатостью статора и ротора со стороны воздушного зазора, а также дискретностью обмоток АД, то с учетом [8,10] и расчетной

схемы, смещение правой опоры на величину h_2 вызывает смещение i -го листа сердечника ротора на величину

$$d_i = h_2 l_i / l, \quad (1.1)$$

где l_i - расстояние от первой опоры до i -го листа сердечника ротора.

Анализ получаемых математических выражений значительно упростится, если принимать h_2 положительной величиной.

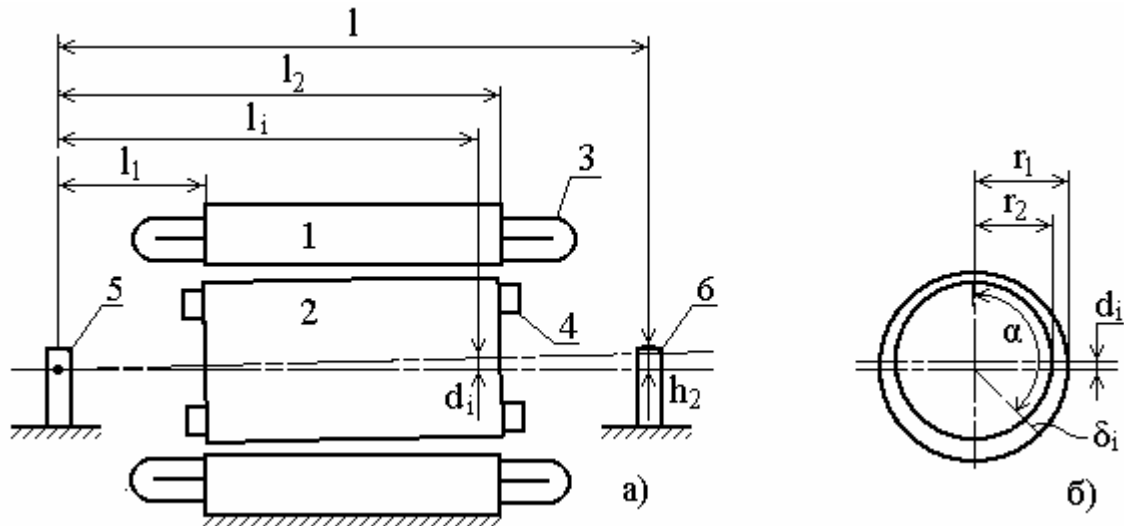


Рисунок 1.3. Расчетная схема для определения смещения элементов сердечника ротора

Если при эксцентриситете ротора за начало отсчета вдоль воздушного зазора принять точку с его минимальной величиной, то тогда в зависимости от α по рисунку 1.3,б его величина для i -о листа сердечника ротора равна:

$$\delta_i = k_\delta \delta_H - d_i \cos \alpha, \quad (1.2)$$

где δ_H - номинальная величина воздушного зазора;

k_δ - коэффициент Картера.

При этом удельная проводимость воздушного зазора АД, между i -м листом сердечника ротора и статора

$$\lambda_i = \mu_0 / k_\delta \delta \left(1 - \frac{d_i}{k_\delta \delta_H} \cos \alpha \right), \quad (1.3)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума.

Если в соответствии с [8,10] разложить вторую часть этого выражения в ряд Фурье и ограничиться нулевым и первым членами ряда, то удельная проводимость воздушного зазора АД

$$\lambda = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta_n} \lambda_0 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \cos \alpha \right), \quad (1.4)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{\sqrt{1 - \varepsilon_i^2}}, \quad \lambda_1 = \frac{2}{(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_i^2}}{\varepsilon_i \sqrt{1 - \varepsilon_i^2}} dl.$$

где $\varepsilon_i = d_i / \delta_n$ - эксцентриситет i -го листа сердечника ротора.

Тогда, в режиме холостого хода индукция магнитного поля воздушного зазора АД от магнитодвижущей силы (МДС) F_{m1} основной гармонической статора

$$B_\delta = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta_n} \lambda_0 F_{m1} \left\{ \cos(\omega_1 t - p\alpha) + \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} \cos[\omega_1 t - (p \pm 1)\alpha] \right\}, \quad (1.5)$$

где ω_1 - угловая скорость первой гармоники тока статора I_1 при частоте f_1 ; p - число пар полюсов АД.

Магнитодвижущая сила основной гармонической статора определяется как

$$F_{m1} = 2\sqrt{2} I_1 w_1 k_{o1} / p\pi, \quad (1.6)$$

где w_1 - число последовательно соединенных витков в обмотки статора;

$k_{o1} = k_{y1} k_{p1}$ - обмоточный коэффициент обмотки статора;

$k_{p1} = \sin(q_1 \pi p / z_1) / q_1 \sin(\pi p / z_1)$ $k_{y1} = \sin(y_k \pi / 2\tau)$ - коэффициенты распределения и укорочения обмотки статора;

τ - полюсное деление;

y_k - ширина катушки обмотки статора;

q_1 - число катушек в катушечной группе статора;

z_1 - число зубцов статора.

Таким образом, магнитное поле воздушного зазора при эксцентриситете ротора АД содержит не только основное магнитное поле с числом пар полюсов p , но и дополнительное из двух составляющих с $p \pm 1$ числом пар полюсов. В результате его можно представить в виде

$$B_\delta = B_{\delta n} + B_{\delta d1} + B_{\delta d2} = B_{\delta n} + B_{\delta d}, \quad (1.7)$$

где $B_{\delta n} = \mu_0 \lambda_0 F_{m1} \cos(\omega t - p\alpha) / k_{\delta} \delta$ - индукция магнитного поля воздушного зазора АД с числом пар полюсов p и частотой f_1 ;
 $B_{\delta d1} = \frac{\mu_0 \lambda_1 F_{m1}}{2 k_{\delta} \delta} \cos(\omega t - (p+1)\alpha)$ и $B_{\delta d2} = \frac{\mu_0 \lambda_1 F_{m1}}{2 k_{\delta} \delta} \cos(\omega t - (p-1)\alpha)$ - индукция составляющих дополнительного магнитного поля в воздушном зазоре АД с числом пар полюсов $p \pm 1$ и частотами $f_{1\pm 1/p} = f_1(1 \pm 1/p)$.

Если воспользоваться терминологией принятой в [18], то частота f_1 является несущей, а частоты $f_{1\pm 1/p} = f_1(1 \pm 1/p)$ - боковыми.

Также как и основное поле воздушного зазора, дополнительное поле индуцирует в элементах обмоток статора и ротора ЭДС. Однако схема соединений обмотки такова, что суммарная ЭДС в ней от полей с $p \pm 1$ парами полюсов всегда равна нулю. Поэтому токов в обмотке статора от этой ЭДС не возникает.

В тоже время составляющие дополнительного поля с $p \pm 1$ парами полюсов вращаются асинхронно с ротором. Поэтому они индуцируют в «беличьей клетке» составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$, которые, в свою очередь, создают свое ослабляющее магнитное поле в воздушном зазоре. Величина магнитной индукции [10] этого поля определяется как

$$B_{\delta d} = \frac{\mu_0 \lambda_1 F_{m1}}{2 k_{\delta} \delta} (1 - D_{p\pm 1}) \cos(\omega t - (p \pm 1)\alpha), \quad (1.8)$$

где $D_{p\pm 1}$ - коэффициент ослабления (демпфирования) дополнительного поля, который по [8,10] в соответствии с расчетом Иордана и Фрейса в зависимости от числа пар полюсов следует принимать равным $0,25 \div 0,3$.

Из выражения (1.8) становится ясно, что величина дополнительной МДС ротора в режиме холостого хода

$$F_{2d} = (1 - D_{p\pm 1}) F_{\delta} \lambda_1, \quad (1.9)$$

где F_{δ} - МДС воздушного зазора.

Величина дополнительного тока в стержнях «беличьей клетки» равна [3]

$$I_{2d} = \frac{F_{2d} (p \pm 1)}{0,225 z_2} \quad (1.10)$$

где z_2 - число пазов ротора.

В общем случае ток I_{2d} пропорциональны индукции магнитного поля воздушного зазора B_{δ} , а поэтому зависят только от режима работы АД. На

рисунке 1.4,а с учетом [3] эта теоретическая зависимость приведена в виде $k_s = f(s)$. В результате при эксцентриситете ротора ток в обмотке статора

$$I_{1\vartheta} = I_1 + I_{1xx}(1 - D_{p\pm 1})\lambda_1 k_s / 2, \quad (1.11)$$

где I_1 и I_{1xx} - ток статора в режимах нагрузки и холостого хода;

k_s – коэффициент изменения индукции магнитного поля в воздушном зазоре в зависимости от скольжения АД.

Результаты расчета тока фазы $I_{1\vartheta}$ на АД АО-31-4 при эксцентриситете ротора показаны на рисунке 1.4,б линией, а результаты эксперимента – точками. Их анализ показывает, что описанный метод расчета токов в обмотках статора и ротора при эксцентриситете позволяет рассчитывать их с погрешностью порядка 2-10%.

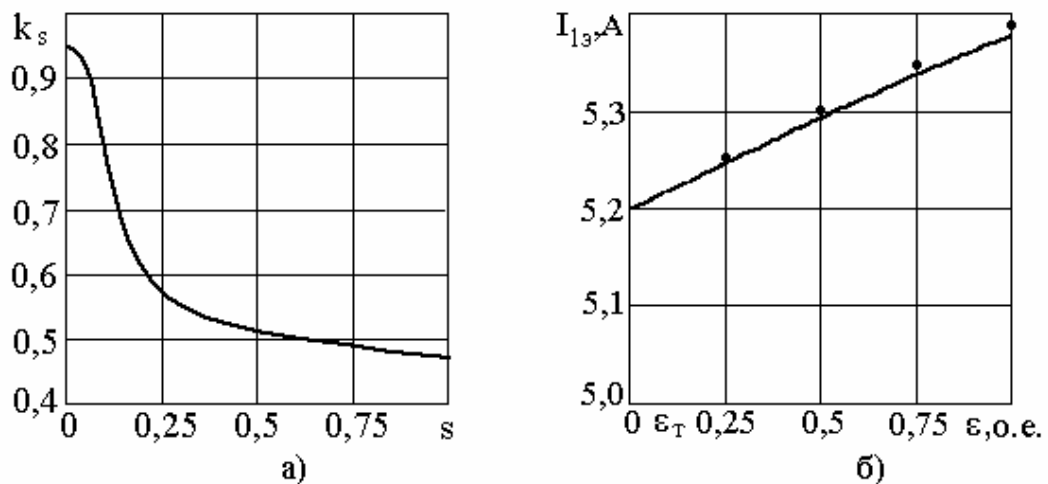


Рисунок 1.4 - Зависимости $k_s = f(s)$ и тока статора от эксцентриситета ротора для АД АО-31-4.

Кроме того, из рисунка 1.4,б видно, что рост эксцентриситета ротора сопровождается ростом тока статора, а, следовательно, ростом перерасхода электроэнергии.

Определение токов в статоре и роторе при его эксцентриситете для основной гармоники дает основание утверждать, что каждая гармоника тока статора АД имеет дополнительный ток из двух составляющих с частотами:

$$f_{v\pm 1/p} = f_1(v \pm 1/p), \quad (1.12)$$

где v - номер гармоники тока статора.

При этом, токи гармоник обозначаются I_v , а составляющие дополнительного тока с частотой боковых - $I_{v\pm 1/p}$. Таким образом, при отсутствии эксцентриситета ротора ток статора

$$I_{1\phi н} = \sum_v I_v . \quad (1.13)$$

При этом величина дополнительного тока статора

$$I_{1\phi д} = \sum_v I_{v\pm 1/p} , \quad (1.14)$$

а ток статора при эксцентриситете ротора

$$I_{1\phi} = \sum_v (I_{v\pm 1/p} + I_v) = I_{1\phi н} + I_{1\phi д} \quad (1.15)$$

Из рассмотренного становится ясно, что при диагностике эксцентриситета ротора в качестве измеряемого параметра могут использоваться гармонические тока статора, а в качестве диагностического признака повреждения - составляющие дополнительного тока.

1.3 Ущерб от эксцентриситета ротора

Ущерб от эксцентриситета ротора АД в основном состоит из механических повреждений при задевании ротора за статор и из электрических потерь во время его эксплуатации.

Иногда при эксцентриситете ротор задевает статор. Под действием трения сердечники разогреваются, и одновременно происходит «зализ» их поверхностей. Разогрев сердечников вызывает ускоренное тепловое старение изоляции с последующим коротким замыканием в обмотке статора или разрушение обмотки ротора [7]. В результате АД требует дорогостоящего ремонта обмоток статора, а при выплавлении литой обмотки ротора он полностью выходит из строя. Кроме того, во время ремонта требуется устранение «зализа» сердечника статора, иначе дальнейшая эксплуатация АД будет сопровождаться «пожаром» в сердечнике из-за замыкания его листов. Эта операция требует длительного и кропотливого ручного труда. Иногда проще использовать новый АД.

Как показывает практика эксплуатации, практически все АД работают с эксцентриситетом ротора. При этом эксцентриситет ротора можно разделить на технологический и эксплуатационный.

Технологический эксцентриситет ε_T является величиной постоянной для АД с литым корпусом и подшипниковыми щитами. Его двигатель получает при изготовлении на заводе вследствие неточно изготовленных элементов конструкции. Поэтому величина технологического эксцентриситета при отпуске с завода определена уровнем технологии, квалификации персонала и контролем качества выпускаемой продукции. В соответствии с [6, 11] для АД с небольшим воздушным зазором можно принять величину технологического

эксцентриситета $\varepsilon_T = 0,1$. При этом величина тока статора определяется по зависимости $I_{13}(\varepsilon)$ как это показано на рисунке 1.5, где технологическому эксцентриситету соответствует ток статора I_{131} .

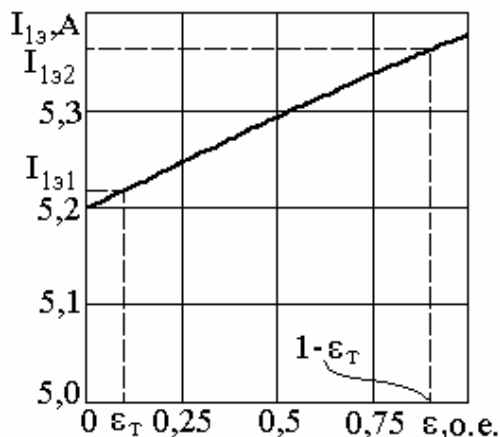


Рисунок 1.5 - Определение диапазона диагностирования эксцентриситета ротора по величине технологического эксцентриситета для АД АО-31-4.

Технологический эксцентриситет в АД со сварными корпусами и выносными опорами ротора с одной стороны зависит от точности изготовления его элементов, а с другой стороны – от квалификации обслуживающего персонала. Так как именно обслуживающий персонал выставляет величину воздушного зазора с помощью перемещения опор. Но и в этом случае для простоты величину ε_T можно принимать также равной 0,1.

Эксплуатационный эксцентриситет в АД с литым корпусом и подшипниковыми щитами возникает за счет износа подшипников и «разбития» места их посадки. В АД со сварными корпусами и выносными опорами ротора он является следствием износа подшипников или сдвига выносных опор. Из практики эксплуатации АД [6, 11] известно, что до 30-50% из них длительное время работают со статическим эксцентриситетом ротора, который может достигать величин $\varepsilon_{\max} = 1 - \varepsilon_T$. Этой величине эксцентриситета по рисунку 1.5 соответствует ток статора равный I_{132} .

При большей величине резко возрастает вероятность задевания ротора за статор под воздействием вибраций АД и приводного механизма, а также приводного ремня, которые сопровождаются некоторым изгибом вала и смещением сердечника ротора. Таким образом, работа АД без задевания ротора за статор с учетом его механических возможностей допустима только в диапазоне от ε_T до $\varepsilon_{\max} = 1 - \varepsilon_T$.

При эксцентриситете ротора эксплуатационные характеристики АД ухудшаются, а потребление электроэнергии увеличивается. Ущерб от перерасхода электроэнергии ориентировочно можно рассчитать следующим образом.

В соответствии с результатами расчета и эксперимента при эксцентриситете ротора в диапазоне от ε_T до $\varepsilon_{\max}$ в режиме номинальной нагрузки ток в обмотке статора возрастает на величину дополнительного тока от 5,22А до 5,36А, то есть добавочные потери будут составлять от 0,38-3,08% от номинальной мощности. Таким образом, перерасход электроэнергии за год у АД АО-31-4 мощностью 2,7кВт составит

$$W_{\text{доп}} = 3U_{\phi} \cdot (I_{1\phi} - I_{1\phi n}) \cdot t_{\text{год}} = \frac{(0,38 \div 3,08)\%}{100} \cdot S_{\text{АД}} \cdot t_{\text{год}} =$$

$$(0,38 \div 3,08) / 100 \cdot 2,7 \cdot 8760 = 89,9 \div 728,5 \text{ кВт},$$

где U_{ϕ} - фазное напряжение АД;

$S_{\text{АД}}$ - мощность АД;

$t_{\text{год}}$ - количество часов работы в год, обычно принимается равным 8760 часов.

Даже при стоимости 9,24 тенге за киловатт на сегодняшний день ущерб от эксплуатации АД АО-31-4 составит порядка 830-6730 тенге. Ущерб от некоторых наиболее распространенных типов АД, используемых в собственных нуждах электрических станций, приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1

№	Тип АД	Мощность, кВт	Стоимость АД, тенге	Ущерб за год, тенге
1	АТД-8000-6000	8000	2 490 000	2 460 648 - 19 944 207
2	АО-21-49-16	3200	2 100 000	984 259 - 7 977 862
3	ДАЗО 1916-10У1	2700	1 800 000	830 469 - 731 169
4	ДАЗО 1916-8У1	1100	1 400 000	338 339 - 2 742 328
5	ДАЗО 1914-10У1	620	950 000	190 700 - 1 545 676
6	ДАЗО-500Х-6У1	315	645 000	96 888 - 785 303

Сопоставление данных столбцов «Стоимость АД» и «Ущерб за год» позволяет сделать вывод, что ущерб от эксцентриситета ротора за один год эксплуатации соизмерим со стоимостью самого АД. Результаты этого сопоставления, несомненно, подтверждают актуальность задачи своевременной и точной диагностики этого вида повреждения.

1.4 Методы диагностики по электрическим параметрам

Как известно, при эксцентриситете ротора возникает неравномерность воздушного зазора, которая приводит к появлению в полях этого зазора и в токах обмоток дополнительных гармонических с частотами, определяемыми по формуле 1.12 [8, 10, 19].

Из практики эксплуатации АД известно, что эксцентриситет сопровождается односторонним магнитным притяжением [8], пульсациями

фазного тока статора при пуске, снижением электромагнитного момента и коэффициента мощности, а также увеличением вибраций и расхода электроэнергии. Очевидно, что изменение именно этих параметров может служить информационными признаками при диагностировании эксцентриситета ротора.

С учетом изложенного в разделе 1.1 становится ясно, что основной задачей диагностики эксцентриситета ротора является обнаружение его на ранней стадии развития, когда он еще не оказывает существенного воздействия на работоспособность АД, это поможет не допустить катастрофического развития дефекта.

Все известные методы диагностики эксцентриситета ротора можно разделить на две основные группы. Это методы тестовой и функциональной диагностики [20,21]. В первой группе, как правило, при диагностике формируются искусственные возмущения и по степени их искажения судят о состоянии АД. Такие методы широко используются для диагностирования во время производства или на неработающем двигателе.

В группе методов функциональной диагностики вся необходимая информация извлекается непосредственно из сигналов, измеренных в процессе эксплуатации АД. Эти методы основаны на прямых или косвенных измерениях и анализе определенных физических параметров работающего двигателя. Наиболее удобно диагностику осуществлять по его электрическим и электромагнитным параметрам [22].

Под электрическими параметрами понимается изменение амплитуд, частот и фаз токов, а также напряжений возникающих при эксцентриситете ротора [22]. Диагностика АД путем их измерения получила широкое распространение благодаря достаточно высокой степени достоверности и доступности диагностических параметров [23,24].

Один из широко известных методов диагностики по электрическим параметрам заключается в выявлении из тока статора характерных частот определенной величины, которые свидетельствует о наличии эксцентриситета ротора [23,24]. Метод прост и позволяет дать ориентировочную характеристику эксцентриситету ротора.

Недостатком этого метода является то, что ток статора не является стационарным сигналом. Поэтому для достоверной оценки эксцентриситета ротора потребуются сложные методы обработки сигнала, а диагностирование следует осуществлять в одном специально выбранном режиме.

Явным преимуществом данного метода является то, что проведение мониторинга тока АД, в отличие от вибродиагностики, можно выполнить непосредственно на кабеле без разрыва цепи питания или с вторичной обмотки трансформатора тока непосредственно в распределительном устройстве [22].

М.А. Гашимов М.А. и др. [25] экспериментальным путем установили, что при эксцентриситете искажается синусоидальность и симметричность фазных напряжений и токов, появляются дополнительные гармоники, а также растет их значение относительно первой гармоники. При этом по сравнению с пульсациями полного фазного тока и его первой гармоники наиболее сильную

пульсацию имеет третья гармоника, которую и предлагается использовать в качестве информационного признака эксцентриситета ротора.

Недостатком этого метода является наличие в питающей сети третьей гармонической, вызываемой работой выпрямительной и инвертирующей аппаратурой, насыщением электрических машин и аппаратов, а также работой электродуговых печей, в которых третья гармоническая может достигать 30% от основной гармонической.

В работах Subhasis N., Hamid A. Toliyat и Rodrigues I, Alves R. [26, 27] предлагается определять статический эксцентриситет ротора на основе «токового» метода (MCSA). Авторы показали уравнения, описывающие частотные составляющие для эксцентриситета ротора

$$f_v = f_1 \left[kz_2 \frac{(1-s)}{p} \pm v \right], \quad (1.16)$$

где f_1 - частота сети;

z_2 - количество пазов ротора;

s - скольжение;

p - число пар полюсов;

k – постоянная, принимающая значения 1, 2...;

v - порядок временных гармоник статора ($\pm 1, \pm 3, \pm 5$, и т.д.).

В случае если одна из этих гармоник кратна трем, то в токе трехфазного АД она отсутствует.

Кроме того в [27] предлагается определять одновременное присутствие статического эксцентриситета по низкочастотным составляющим вблизи основной гармоники сети как

$$f_v = f_1 \|1 \pm ks\|, \quad (1.17)$$

где $k=1, 2, 3, \dots$

По [27] величины этих низкочастотных составляющих зависят от числа пар полюсов, а потому только определенные соотношения числа пар полюсов ротора и числа пазов приводит к появлению этих составляющих при эксцентриситете ротора.

Кроме того, в [27] проводится сравнение диагностических признаков эксцентриситета ротора АД в режиме эксплуатации. В результате этого авторы выяснили, что для определения эксцентриситета можно использовать мгновенные токи и мощность, при этом чувствительности устройства диагностики будет достаточно для определения незначительной величины.

Эти выводы правомерны только при стационарных токах статора. Значительные погрешности при диагностике вносит нестабильность питающего напряжения. Этот эффект увеличивается из-за отсутствия однородности потока

в воздушном зазоре АД, вызванного неравномерным зазором между статором и ротором.

Известен также метод выявления эксцентриситета ротора с помощью анализа спектров модулей векторов Парка тока (далее PI) и напряжения (далее PU) [28]. При этом осуществляется запись токов и напряжений всех фаз, затем они фильтруются фильтрами низких частот с частотой среза выше наибольшей полезной частоты сигнала. После чего формируются спектры PI и PU, которые подвергаются спектральному анализу.

Вывод о наличии эксцентриситета АД делается на основе сравнения значений амплитуд PI на частотах, характерных для повреждений, с уровнем сигнала при частоте, равной нулю. Если амплитуды PI на характерных частотах ниже амплитуды модуля PI на частоте 0 Гц на заданную величину, делается вывод о хорошем техническом состоянии электродвигателя и связанных с ним механических устройств. В случае если указанная разница между амплитудами больше заданной величины, делается заключение о наличии соответствующего данной характерной частоте PI повреждения.

Преимуществом данного метода, по сравнению с другими, является повышение точности диагностирования, за счет двойного учета модулируемой частоты и формирования базы данных измерений в целях отслеживания динамики фактического развития повреждений и прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Недостатком является сложность реализации, заключающаяся в необходимости измерения токов и напряжений во всех трех фазах диагностируемого АД.

Интересный метод диагностирования эксцентриситета ротора предлагается в работе А. Stavrou [29]. Автор предлагает определять эксцентриситет по величине полного сопротивления электрической машины. Идея использования вектора полного сопротивления для определения динамического эксцентриситета перспективна, так как процедура реализации проста.

Недостаток метода заключается в низкой его чувствительности и невозможности диагностировать статический эксцентриситет ротора.

Магнитными параметрами принято считать изменение, как правило, магнитных полей рассеяния, которые возникают при эксцентриситете ротора. Диагностика АД путем их измерения магнитных измерений позволяет определять с высокой точностью величину смещения ротора [30].

Так, Никиян Н.Г. и др. [31] предлагают сравнительно простое устройство, которое устанавливается внутри двигателя и позволяет достаточно точно измерять силу одностороннего магнитного притяжения.

Там же приводится сравнительный анализ методов диагностики по ЭДС системы измерительных катушек в воздушном зазоре (ЭСК) и метод определения потенциала нейтральной точки звезды обмотки статора относительно нейтральной точки звезды резисторов (ПНТ). По мнению авторов [31], первый метод обладает большей чувствительностью и не требует дополнительной обработки диагностического сигнала. Основным его

недостатком является необходимость разборки АД для установки измерительных катушек. Во втором методе измеряется ЭДС между нейтральной точкой звезды обмотки статора и нейтральной точкой звезды резисторов, подключенной к питающим зажимам двигателя. Этот метод менее чувствителен и требует выделения высших гармоник определенных частот из измеренной ЭДС. Кроме того, для реализации данного метода из коробки выводов АД следует вывести нейтральную точку обмотки статора. Следует добавить, что значительная часть АД не имеет этой нейтральной точки.

Схема получения информации об эксцентриситете ротора из тока фазы зависит от напряжения питания АД и его мощности. В низковольтных и маломощных двигателях ток фазы при диагностике эксцентриситета ротора можно осуществлять по схеме на рисунке 1.6,а, где эта информация представлена в виде напряжения $U_{\text{ну}}$ нормирующего устройства (НУ); $R_{\text{ш}}$ - сопротивление шунта НУ. Для высоковольтных и мощных АД используются схемы, приведенные на рисунках 1.6,б и 1.6,в, где ТА – трансформатор тока [32]. На рисунке 1.6,в роль шунта выполняет амперметр А1.

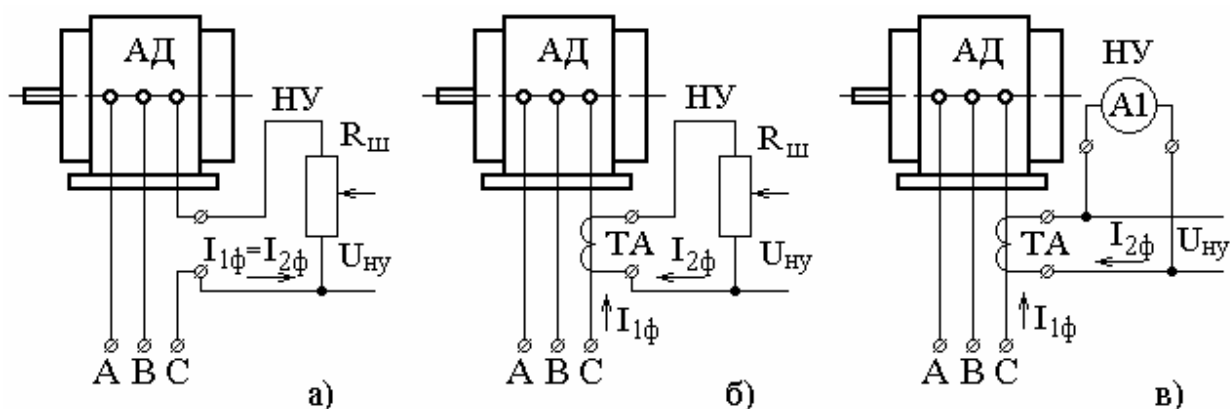


Рисунок 1.6 - Схемы получения информации об эксцентриситете ротора из тока статора АД

Размещение в комплектном распределительном устройстве (КРУ) измерительных трансформаторов тока и напряжения, амперметров и вольтметров показано на рисунке 1.7, где 1 – отсек сборных шин; 2 – изолятор опорный; 3 – изолятор проходной; 4 – розетки; 5 – верхняя съемная крышка; 6 – перегородка; 7 – нижняя съемная крышка; 8 – отсек трансформаторов тока; 9 – трансформаторы тока; 10 – шторочный механизм; 11 – кабельные заделки; 12 – розетки; 13- трансформатор тока типа ТЗЛ или ТЗЛМ; 14 – ножи заземляющие; 15 – выкатной элемент; 16 – передняя дверь; 17 – релейный шкаф; 18 – корпус шкафа; 19 – разгрузочный клапан; 20 – разъем штепсельный.

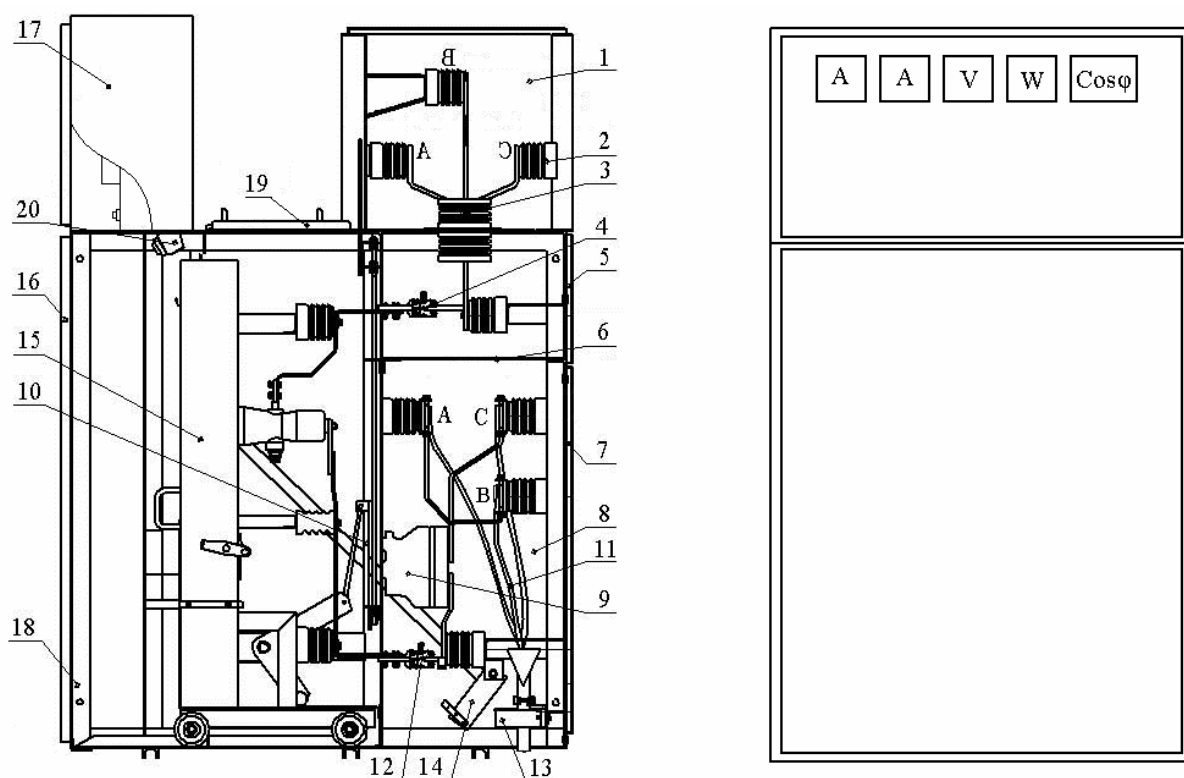


Рисунок 1.7 - Размещение элементов в КРУ

Информацию об эксцентриситете ротора в виде тока, напряжения или мощности в случае использования КРУ удобно получать непосредственно с клемм соответствующих приборов при открытой крышке блока релейного шкафа.

В качестве альтернативного источника информации в системах диагностики эксцентриситета ротора могут использоваться индукционные измерительные преобразователи, которые измеряют магнитные поля АД. Иногда их называют магнитными трансформаторами тока. Вопрос об использовании таких источников информации настолько значителен, что в 2001 г рассматривался специально на 38 сессии СИГРЭ в Париже на заседании посвященном теме «...замена традиционных трансформаторов тока и напряжения новыми датчиками тока и напряжения и влияние их на проектирование защит...» [33].

1.5 Методы диагностики по электромагнитным параметрам

Источниками информации об эксцентриситете ротора при диагностике по электромагнитным параметрам служат измерительные преобразователи (ИП) [34] в виде катушек индуктивности, которые измеряют магнитные поля воздушного зазора, дифференциального и зубцового рассеяния, а также поля в торцевой зоне и внешние поля. Таким образом, конструкция, место расположения измерительных катушек и их количество зависит от того, какие магнитные поля измеряются и для каких целей. Основные особенности

конструкции ИП рассмотрены в [30]. Однако не все они могут использоваться для получения информации об эксцентриситете ротора.

Анализ положения неравномерности воздушного зазора относительно статора при эксцентриситете ротора и распределения магнитных потоков как внутри, так и снаружи машины, показывает, что получить информацию об этом повреждении можно используя ИП, которые способны измерить двухполюсную магнитную несимметрию АД [8], неподвижную относительно воздушного зазора. Основные из таких ИП и место их расположения показаны на рисунке 1.8, где 1 – Ω - образный ИП; 2 – ИП с ферромагнитным сердечником; 3 и 4 - корпус и обмотка кольцевого ИП; 5 и 6 – точечные ИП для внутренней и внешней установки.

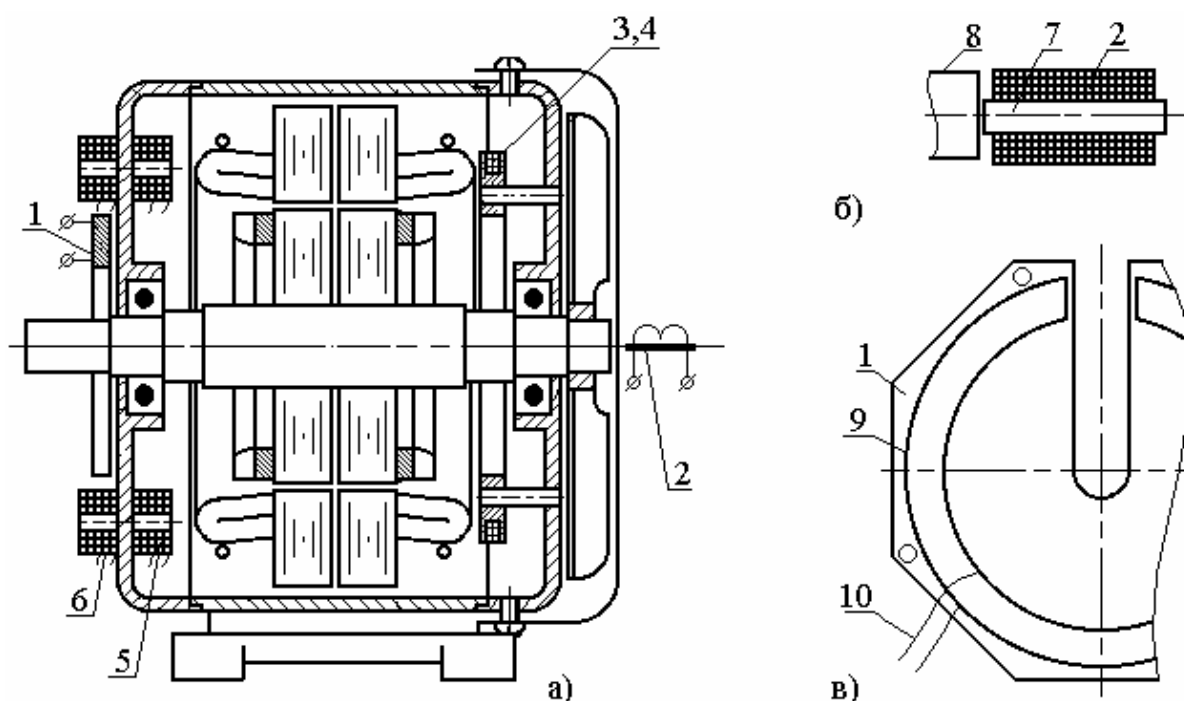


Рисунок 1.8 – Основные виды ИП для измерения магнитной несимметрии

Как видно из рисунка, все виды ИП можно условно подразделить на кольцевые, обладающие осевой симметрией и точечные, комбинация которых способна выделять двухполюсную магнитную несимметрию АД.

Так в устройстве [35] для измерения магнитной несимметрии предлагается использование ИП 2 с ферромагнитным сердечником 7, устанавливаемого на торце вала ротора 8. Его вариантом [36] является съемный преобразователь 1 типа Ω . Оба преобразователя съемные. Их конструкция приведена на рисунках 1.9,б и 1.9,в, где 9 и 10 - обмотка ИП типа Ω с выводами. Эти ИП предназначены для наружной установки, часто только на период диагностики АД.

Также для измерения магнитной несимметрии можно использовать кольцевые ИП 4, устанавливаемый внутри АД [37-40]. Они представляют собой плоскую цилиндрическую катушку [37] или одновитковый контур [38],

устанавливаемые так, чтобы ее плоскость ИП была перпендикулярна оси вращения ротора, а его геометрический центр находился на этой оси. Диаметр кольцевого ИП варьируется от диаметра вала до диаметра кожуха. Чаще всего его принимают равным диаметру лобовой части обмотки статора. Преобразователь идеально вписывается в конструкцию торцевой зоны ЭМ, а установка не вызывает особых затруднений. Обычно кольцевой ИП крепят к подшипниковому щиту, корпусу ЭП, лобовой части обмотки статора, бандажному кольцу или его элементам.

Конструкция и места размещения устанавливаемых внутри АД точечных ИП более разнообразны. Установка таких преобразователей требует разборки машины и является стационарной. Их устанавливают на подшипниковых или торцевых щитах, в пазах статора под клин, на зубцах статора и в воздушном зазоре.

Точечные ИП для внутренней установки на подшипниковых или торцевых щитах [41] представляют собой небольшие катушки круглой или прямоугольной формы. Конструктивно точечный ИП прост. Он имеет каркас из термореактивной пластмассы с двумя металлическими клеммами 2. В паз каркаса наматывается катушка из изолированного провода, выводы которой припаяны к клеммам. К ним же паяют коммутационные проводники. На практике удобно в качестве ИП использовать серийно выпускаемые катушки от реле РП-25, РП-211 и РП-213. Размещаются такие ИП равномерно по окружности, соосной воздушному зазору; при контроле эксцентриситета — диаметрально-противоположно.

Конструкция обмотки статора АД позволяет размещать точечные ИП в пазах для основной обмотки в зависимости от ее типа, как показано на рисунке 1.9,а и 1.9,б где 1 – обмотка статора; 2 – пазовый клин; 3 – обмотка ИП. В этом случае их укладывают под клин 2 паза в виде дополнительной обмотки 3. Эта обмотка в зависимости от целей устройства выполняется по-разному [42-46].

Иногда катушки 3 преобразователя наматывают на клинья, как показано на рисунке 1.9,в [47].

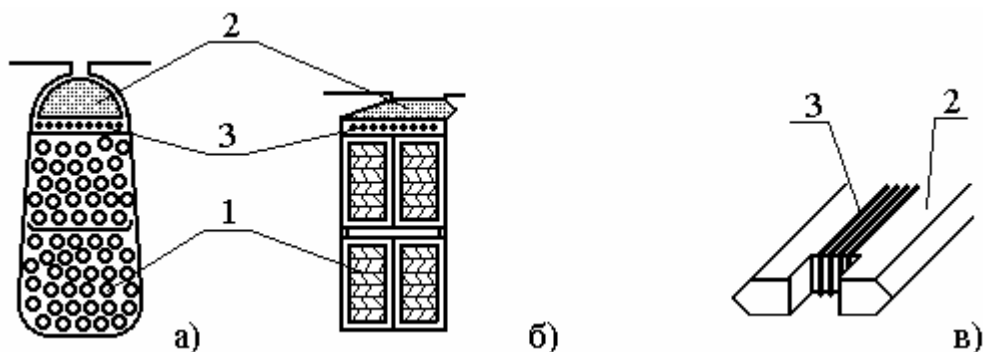


Рисунок 1.9 - ИП для установки в пазах статора

Воздушный зазор между статором и ротором мал и в зависимости от мощности АД составляет 0,3-2,5 мм. Эксплуатировать в нем что-либо без механического повреждения при возможности смещения ротора невозможно. Поэтому, преобразователи устройства [47,48] закрепляются на статоре в непосредственной близости воздушного зазора у короткозамыкающего кольца ротора. ИП в [49] размещают между пакетами сердечника статора в вентиляционном канале у воздушного зазора в немагнитной трубе.

Методы определения эксцентриситета по магнитным полям рассеяния с использованием рассмотренных ИП немногочисленны.

Так, по [49] размещенные в пазах ИП с шагом, равным полюсному делению измеряемой гармоники и последовательно соединенными обмотками, способны измерить одну из гармонических магнитного поля в воздушном зазоре с числом пар полюсов $p \pm 1$. ЭДС в измерительных катушках от остальных гармонических магнитного поля зазора в этом случае будут равны нулю.

При диагностике эксцентриситета ротора по [50,51] следует использовать четыре ИП, которые располагают на диаметрально противоположно расположенных зубцах статора. В [50] обмотки ИП соединяют попарно последовательно и по величинам ЭДС этих пар путем преобразования сигнала определяют величину эксцентриситета ротора. В [51], расположенные аналогично катушки, соединяют в звезду.

В устройстве [52] три ИП также соединяют в звезду. Одноименные выводы обмоток ИП подключают к резисторам соединенным в звезду. Блок для обработки сигналов выполняют в виде интегрирующего вольтметра постоянного тока, который присоединяют к общим точкам обеих звезд.

В технических решениях [50-52] измерительные катушки размещаются на статоре электрической машины под клин.

Однако, использование таких ИП в системах диагностики сопряжено со сложностью расположения в машине, контролем его целостности и обеспечения электрической безопасности обслуживающего персонала, особенно на высоковольтных АД. Кроме того, установка таких ИП значительно снижает надежность АД.

В способе [53] косвенного контроля неравномерности воздушного зазора АД ИП размещается на внешней поверхности двигателя. От этого ИП получается сигнал, из которого определяется постоянная составляющая времени выбега АД при его отключении от сети. Так как время выбега у некоторых двигателей очень мало зависит от нагрузки, то этот способ сложен в реализации. Несомненным достоинством его является то, что при установке измерительной катушки не нужно разбирать машину, а сам сигнал не зависит от частоты сети.

В устройстве [54,55] измерительная катушка, устанавливается на торце машины концентрично оси ротора. В качестве измеряемого параметра [55], выбирается величина потока рассеяния, обусловленная наличием постоянной составляющей магнитной индукции в зазоре при симметричной намагничивающей силе, вызванной несимметрией магнитной системы при

включении и отключении машины от сети. Устройство имеет четыре фильтра. Все это усложняет процесс измерения эксцентриситета ротора из-за ограничения времени.

В [54] измеряемым параметром является ЭДС датчика магнитного потока вала ротора с частотой $100 \geq f_g \geq 92$ Гц, при этом устройство содержит несколько активных и пассивных фильтров при нестационарном сигнале. Это значительно усложняет ее реализацию, а иногда делает практически невозможной.

Устройство диагностики эксцентриситета ротора [56] получает информацию о повреждении от ИП расположенного в непосредственной близости от короткозамкнутого кольца ротора, из которой выделяет гармонические составляющие с частотами $f_{v \pm 1/p} = f_1(v \pm 1/p)$. При этом высокая чувствительность системы диагностики не компенсирует сложность установки и контроля целостности ИП.

Способ диагностики эксцентриситета ротора [57] заключается в том, что измеренный сигнал от ИП на внешней поверхности АД преобразуют в однополярный и выделяют из него гармоническую составляющую с частотой $f_v = f_1 p$. Этот метод позволяет разрабатывать простые системы диагностики с высокой чувствительностью. Однако диагностику состояния АД приходится осуществлять в непосредственной близости от него. Что не всегда возможно.

Несколько необычный способ диагностики предложен в [58], где в качестве ИП используется одна из обмоток статора многоскоростного АД. Однако его реализация на практике сложна из-за необходимости обеспечения электрической безопасности обслуживающего персонала, особенно на АД высокого напряжения.

Из рассмотренных особенностей диагностики эксцентриситета ротора АД по его электрическим и электромагнитным параметрам становится ясно, что использование для этого электромагнитных параметров позволит создавать более чувствительные системы диагностики. Но при этом диагностика АД должна осуществлять непосредственно у АД. В связи с этим системы диагностики АД, которые используют для этого электрические параметры, несомненно, более удобные в эксплуатации. Поэтому далее рассматриваются только эти системы диагностики.

1.6 Выводы

1. Основной причиной появления эксцентриситета ротора АД является форма фиксации вращающихся частей относительно неподвижных. В связи с чем, он происходит из-за повреждения подшипников или смещения их опор.

2. Наиболее удобно при диагностировании АД использовать в качестве источника информации ток статора, получаемый с трансформатора тока.

3. При использовании тока статора для диагностики эксцентриситета ротора в качестве измеряемого сигнала могут использоваться гармонические тока статора, а в качестве диагностического признака повреждения – составляющие его дополнительного тока с частотами $f_1(v \pm 1/p)$.

4. Рост эксцентриситета ротора сопровождается ростом составляющих дополнительного тока статора с частотами $f_1(\nu \pm 1/p)$.

2.1 Методы спектрального анализа сигналов

В системах диагностики эксцентриситета ротора для выделения из сигнала от источника информации гармонических составляющих с характерными для повреждения частотами используется, как правило, спектральный анализ [59,60]. Классификацию методов спектрального анализа применительно к диагностированию эксцентриситета ротора АД можно представить в виде схемы на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Классификация методов спектрального анализа

В подавляющем большинстве существующих систем диагностики электрических машин предполагается, что сигнал с вращающейся машины стационарен, то есть его амплитудно-частотный спектр не изменяется во времени. В этом случае пользуются широко известным методом дискретного преобразования Фурье. Он заключается в представлении любого стационарного периодического сигнала $i(q)$ в виде суммы отдельных гармонических составляющих [18]

$$I(e^{j\omega}) = \sum_{q=0}^{Q-1} i(q) e^{-j\omega q}, \quad (2.1)$$

где Q - количество отсчетов сигнала;

ω - угловая частота сигнала.

При вычислении коэффициентов ряда Фурье по описанной выше формуле требуется выполнить $(Q-1)^2 \approx Q^2$ операций умножения и $Q(Q-1) \approx Q^2$ операций сложения. Это приводит к тому, что с ростом Q резко увеличивается объем вычислений. В связи с этим, в настоящее время, во многих системах диагностики повреждений АД широко применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Алгоритм быстрого преобразования Фурье прост. Поэтому его наиболее часто используют для определения различных повреждений ротора.

Однако сигнал с преобразователя практически всегда нестационарен [61]. В этом случае его использование сопровождается растеканием спектра [62]. Для уменьшения растекания спектра при преобразовании Фурье применяются весовые функции в виде окна, в которых осуществляется коррекция сигнала, путем затухания его к краям весовой функции.

Другим не менее популярным непараметрическим методом спектрального анализа является метод оценки спектральной плотности мощности Уэлча (PSD) [63]. В этом периодограммном методе последовательность данных дискретного сигнала $i(q)$ сначала делится на Z сегментов. Длина каждого сегмента состоит из L выборок, и эти сегменты могут накладываться друг на друга с $(L-S)$ перекрываемых выборок, где S - число точек расположенных между сегментами. На практике, как правило, используется 50% перекрытия [63]. Строго говоря, оптимальная степень перекрытия зависит от вида применяемого окна. Таким образом:

Сегмент 1: $i[0], i[1], \dots, i[L-1]$
Сегмент 2: $i[S], i[S+1], \dots, i[S+L-1]$
.....
Сегмент Z : $i[Q-L], i[Q-L+1], \dots, i[Q-1]$

Взвешенный сегмент Z будет состоять из выборок

$$x^Z[q] = w[q] i[q + zS], \text{ для } 0 \leq q \leq L-1; 0 \leq z \leq (Z-1) \quad (2.2)$$

Функция окна $w[q]$ применена к данным в каждом сегменте перед вычислением периодограммы сегмента. Тогда дискретное преобразование Фурье для каждого сегмента определяется как

$$I^Z(e^{j\omega}) = \sum_{q=0}^{L-1} i^Z(q) e^{-j\omega q} \quad (2.3)$$

Далее по [64] для взвешенных сегментов вычисляются модифицированные периодограммы

$$P_i^Z(e^{j\omega}) = \frac{1}{UL} \left| I^Z(e^{j\omega}) \right|^2 \quad (2.4)$$

где $U = \sum_{q=0}^{L-1} w^2[q]$ - энергия окна;
 $w[q]$ - функция окна.

Разновидности окон приведены в [62]. Спектральная плотность мощности по методу Уэлча вычисляется как

$$P(e^{j\omega}) = \frac{1}{Z} \sum_{z=0}^{Z-1} \frac{1}{UL} \left| \sum_{q=0}^{L-1} x^z[q] e^{-j\omega q} \right|^2 \quad (2.5)$$

Применение весовой функции позволяет ослабить растекание спектра и уменьшить смещение получаемой оценки спектра плотности мощности ценой незначительного ухудшения разрешающей способности. Перекрывание сегментов дает возможность увеличить их число и уменьшить дисперсию оценки [64].

Идея кепстр-анализа заключается в том, чтобы заменить в спектре сигнала от источника информации ось частоты на ось времени, т.е. представить, что этот спектр является просто сигналом. Тогда, определив спектр этого «сигнала» (кепстр), можно легко определить невидимые явно периодичности в этом «сигнале» [65-68]. Что позволяет разделить во времени информацию о сигнале и оценить техническое состояние различных узлов асинхронных двигателей, для которых характерно присутствие иногда десятков гармоник основных частот возбуждения.

Практически всегда сигнал от источника информации не стационарен, то есть изменяется во времени его амплитудно-частотный спектр [69]. Причиной этого является изменение условий эксплуатации АД.

Одним из методов, позволяющих учитывать нестационарность сигнала, является метод оконного преобразования Фурье (STFT) [70-74]. Метод заключается в том, что сигнал делят на сегменты-окна с коротким и одинаковым промежутком времени. После чего к каждому из окон применяют преобразование Фурье [18]

$$I(f, \tau) = \sum_{q=0}^{Q-1} i(q) w[q - \tau] e^{-j\omega q}, \quad (2.6)$$

где $w[q - \tau]$ – оконная функция, τ – сдвиг по времени.

По результатам преобразования строится спектрограмма [75] в виде зависимости $i_v(n)$, по которой легко установить сегменты со стационарным и нестационарным сигналами.

Полученная спектрограмма имеет ограниченное разрешение и точность, которые определяются размером окна. Оптимальным считается оконное преобразование Фурье с гауссовым окном [70], которое получило название преобразование Габора. Главным недостатком является постоянный размер окна.

Преобразование Гильберта-Хуанга также очень известный метод анализа сигналов, который применяется в диагностике электрических машин [76-78]. Это преобразование представляет собой разложение сигнала на эмпирические моды (метод EMD), с последующим применением к полученным компонентам разложения преобразования Гильберта. Метод EMD представляет собой итерационную вычислительную процедуру, в результате которой исходный сигнал $x(n)$ раскладывается на эмпирические моды или внутренние колебания. В отличие от гармонического анализа, где модель сигнала задаётся заранее, эмпирические моды вычисляются в ходе процесса. Разложение на эмпирические моды позволяет анализировать локальные явления, поэтому данный метод может быть использован при обработке нестационарных процессов [79].

В сравнении с традиционным методом преобразования Фурье метод преобразования Гильберта-Хуанга исключает растекание спектра и позволяет с высокой точностью выявить очень низкие частоты.

Реальные нестационарные сигналы чаще всего состоят из кратковременных высокочастотных и длительных низкочастотных компонентов, поэтому для их анализа целесообразно было бы применять преобразование, которое бы обеспечивало узкие окна для высоких частот и широкие окна для низких частот [70]. Вейвлет-анализ основан на использовании окна переменного размера. Его можно представить как передвижение материнского вейвлета вдоль оси времени и ее взаимодействие с контролируемым сигналом. В качестве материнского используются вейвлеты Хаара, Шеннона, Добеши, Мейера, «мексиканская шляпа» и т.д.

Если обозначить материнский вейвлет как $\phi(q)$, то вейвлет-преобразование сигнала $i(q)$ с масштабным параметром a и временным сдвигом τ определяется как

$$W(a, \tau) = \sum_{q=0}^{Q-1} i(q) \phi(q - \tau), \text{ где } \phi(q) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{q}{a}\right). \quad (2.7)$$

Масштабный параметр является, в сущности, величиной, обратной частоте. Поскольку он находится в знаменателе, то при $a > 1$ растягивает сигнал,

а при $a < 1$ сжимает его. Особенностью графиков вейвлет-преобразований является то, что на горизонтальных осях вместо частоты откладываются время и масштабный параметр. Следует добавить, что при общей эффективности метода его алгоритм вычисления сложен [75, 80-86]. Наиболее простым его вариантом является вейвлет – преобразование Хаара [87,88].

В [75-80] показано, что преимущества вейвлет-преобразования начинают проявляться тогда, когда требуется сигнал разделить на его постоянную и переменную составляющие. Кроме того, этот метод преобразования сигнала позволяет выполнять спектральный анализ переходных процессов, например, при пуске АД [89].

Параметрические методы предполагают наличие некоторой статистической модели, наиболее близко аппроксимирующей исходный сигнал, а процесс спектрального анализа в данном случае включает в себя определение параметров этой модели. Наиболее популярным параметрическим методом является авторегрессионный метод Юла – Уолкера [64], в котором на первом этапе определяются параметры авторегрессионной модели сигнала $i(q)$, с помощью имеющихся данных сигнала и функций автокорреляции.

Затем по полученным параметрам авторегрессионной модели рассчитывается спектральная плотность мощности для данной модели [62] как

$$P(e^{j\omega}) = \rho / \left| 1 + \sum b_k(m) e^{-j\omega q} \right|^2, \quad (2.8)$$

где ρ – дисперсия белого шума;

$b_k(m)$ – параметры модели, при $0 \leq m \leq k$;

k – порядок авторегрессионной модели.

Параметры модели определяются путем решения системы линейных уравнений

$$\sum_{m=1}^Q b_m R_x(m-k) = R_x(k), \quad (2.9)$$

где $k = 1, 2, \dots, Q$;

R_x – коэффициенты корреляционной матрицы сигнала;

b_m – коэффициенты авторегрессионной модели.

В свою очередь коэффициенты корреляционной матрицы

$$r_x(h) = \frac{1}{Q} \sum i(q+h) i^*(q), \quad (2.10)$$

где $i^*(q)$ - сдвинутая копия исходного сигнала, $0 \leq h \leq k$.

Следует отметить, что существуют и другие известные авторегрессионные методы, такие как метод Берга, ковариационный метод [90], модифицированный ковариационный метод. Но, как показано в [91] результаты оценивания спектра по всем этим методам мало отличаются друг от друга для реальных сигналов.

В диагностических системах эти методы практически не используются из-за сложности алгоритма. Ценность авторегрессионных методов состоит в том, что при хорошем соответствии выбранной модели исходному сигналу получаются более точные оценки спектра при более высоком разрешении, чем при традиционном методе преобразования Фурье.

Классические методы спектрального анализа просты и эффективны. Однако главным их недостатком является растекание спектра. Применение весовых функций позволяет смягчать эффект растекания, но за счет уменьшения разрешения спектра.

Чтобы улучшить статистическую стабильность спектральной оценки, то есть, чтобы минимизировать оценочное различие, используется усреднение данных, что в свою очередь уменьшает разрешение спектра. Таким образом, необходим компромисс между уровнем стабильности, спектральным разрешением и подавлением растекания спектра.

Одним из таких методов является метод MUSIC (Multiple Signal Classification), в основе которого лежит анализ собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала [62, 75-80].

Сигнал представляется в виде суммы L -синусоид и белого шума как

$$i(q) = \sum_{k=1}^L I_k \exp(j2\pi f_k q + \varphi_k) + e(q), \quad (2.11)$$

где $i(q)$ - исходный сигнал;

$e(q)$ – сигнал белого шума с дисперсией σ^2 ;

A_k , f_k , φ_k – соответственно амплитуда, частота и фаза k -той синусоиды.

Сам метод основан на представлении информации автокорреляционной матрицы. Он позволяет улучшить или поддержать высокую разрешающую способность, не жертвуя стабильностью, использовать только основные спектральные компоненты сигнала и уменьшить шумовое влияние.

Приведенный анализ методов спектрального анализа сигналов от источника информации указывает на их многообразие и специфику применения. В тоже время в электротехнике и электроэнергетике чаще всего для этого используют метод быстрого преобразования Фурье [61, 71, 75, 80, 91].

2.2 Диагностические признаки повреждения

В настоящее время по целому ряду причин, достаточно эффективно выявлять статический эксцентриситет ротора АД в процессе эксплуатации пока не удается [92]. Одной из наиболее важных причин является выбор источника

информации и диагностического признака эксцентриситета ротора. А также оценка влияния на нее помех, вызываемых различными воздействиями со стороны источника питания АД, его нагрузки, а также различных иных воздействий на источник информации.

Традиционно в электроэнергетике при использовании вычислительной техники для выявления из сигнала источника информации гармонических составляющих наиболее часто используется метод быстрого преобразования Фурье [93]. Этот метод прост и дает хорошие результаты при стационарном сигнале.

Для выделения гармонических составляющих из сигнала $i_{\text{ну}}(t)$ длительностью $T_{\text{расч}}$ с помощью БПФ его разбивают на Q равных частей, а интегралы составляющих рядов Фурье [93] заменяют суммами. В результате величины синусной и косинусной, а также постоянной, составляющих ряда определяются как

$$\begin{aligned} I'_v &\approx \frac{2}{Q} \sum_{q=1}^Q i_{\text{ну},q}(t_q) \sin v_1 \omega t_q, \quad I''_v \approx \frac{2}{Q} \sum_{q=1}^Q i_{\text{ну},q}(t_q) \cos v_1 \omega t_q, \\ I_0 &= \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q i_{\text{ну},q}(t_q), \quad I_v = I_0 + \sqrt{I_v'^2 + I_v''^2}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где q - номер текущего интервала, принимающего значения от 1 до Q ;

$e_q(t_q)$ принимает значение $u_{\text{ип}}(t)$ в середине этого интервала q ;

$\omega = 2\pi f_{\text{расч}}$ - угловая частота;

$T_{\text{расч}} = 1/f_{\text{расч}}$ - длительность сигнала;

v_1 - номер рассчитываемой гармонической составляющей.

Как было показано в разделе 1.2, при эксцентриситете ротора в магнитных полях АД и в токах его обмоток статора и ротора появляются гармонические составляющие дополнительного тока с частотами $f_{v \pm 1/p} = f_1(v \pm 1/p)$.

Если для получения информации использовать ток I_1 фазы АД, а для обработки сигнала применить персональный компьютер (ПК) с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в виде звуковой карты ПК [94], то для выявления диагностических признаков эксцентриситета ротора можно использовать блок-схему на рисунке 2.2, где НУ – нормирующее устройство; БОС – блок обработки сигнала, в котором путем разложения в ряд Фурье [18] можно выяснить параметры составляющих дополнительного тока $I_{v \pm 1/p}$ с частотами $f_{v \pm 1/p}$.

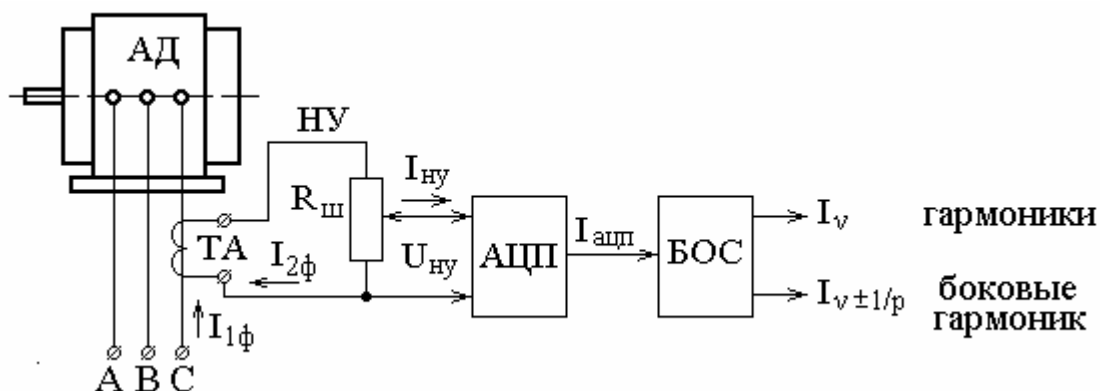


Рисунок 2.2. Блок-схема для выявления диагностических признаков повреждения

Осциллограммы тока фазы I_1 и спектрограммы его гармонических составляющих I_v в экспериментальных исследованиях здесь и далее получались с помощью блока обработки сигнала, реализованного на ПК с программным обеспечением «Елена 2012» [95]. Оно разработано докторантом Крюковой Е.В. на кафедре «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета им. С.Торайгырова в интегрированной среде разработки Delphi. При этом размерности величин дополнительных токов $I_{v1} \div I_{vn}$ получены в единицах БОС. В результате коэффициент передачи по цепи НУ-АЦП-БОС $k_{\text{БОС}} = I_v / I_1 = 1812$. То есть току основной гармонической сети $I_{v50} = 7610$ единиц на шкалах осциллографа и анализатора спектра соответствует ток фазы $I_1 = 4,2 \text{ А}$.

Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленном стенде в лаборатории профессора Новожилова при ПГУ им. С.Торайгырова. В качестве экспериментальных двигателей использовались АД АО-31-4 и АО-41-6. Спектрограммы дополнительных токов АД АО-41-6 в нормальном режиме работы и при наличии эксцентриситета ротора приведены на рисунках 2.3,а и 2.3,б. Они подтверждают наличие в токе фазы I_1 гармонических составляющих дополнительного тока $I_{vn\pm 1/p}$ с частотами $f_{vn\pm 1/p}$, где n принимает значения от единицы до бесконечности. Из спектрограмм видно, что появление эксцентриситета ротора сопровождается изменением составляющих дополнительного тока $I_{vn\pm 1/p}$. Поэтому, они вполне могут использоваться в качестве диагностического признака этого аномального режима работы АД.

Однако эти составляющие дополнительного тока $I_{v1\pm 1/p} \div I_{vn\pm 1/p}$ могут возникать не только из-за эксцентриситета ротора, но и по целому ряду других причин. Из-за чего происходит искажение информации о размерах повреждения. В результате этого, увеличение эксцентриситета не всегда сопровождается ростом составляющих дополнительного тока $I_{v1\pm 1/p} \div I_{vn\pm 1/p}$.

Это подтверждается результатами измерений в таблице 2.1 для АД АО-41-6 в режиме холостого хода.

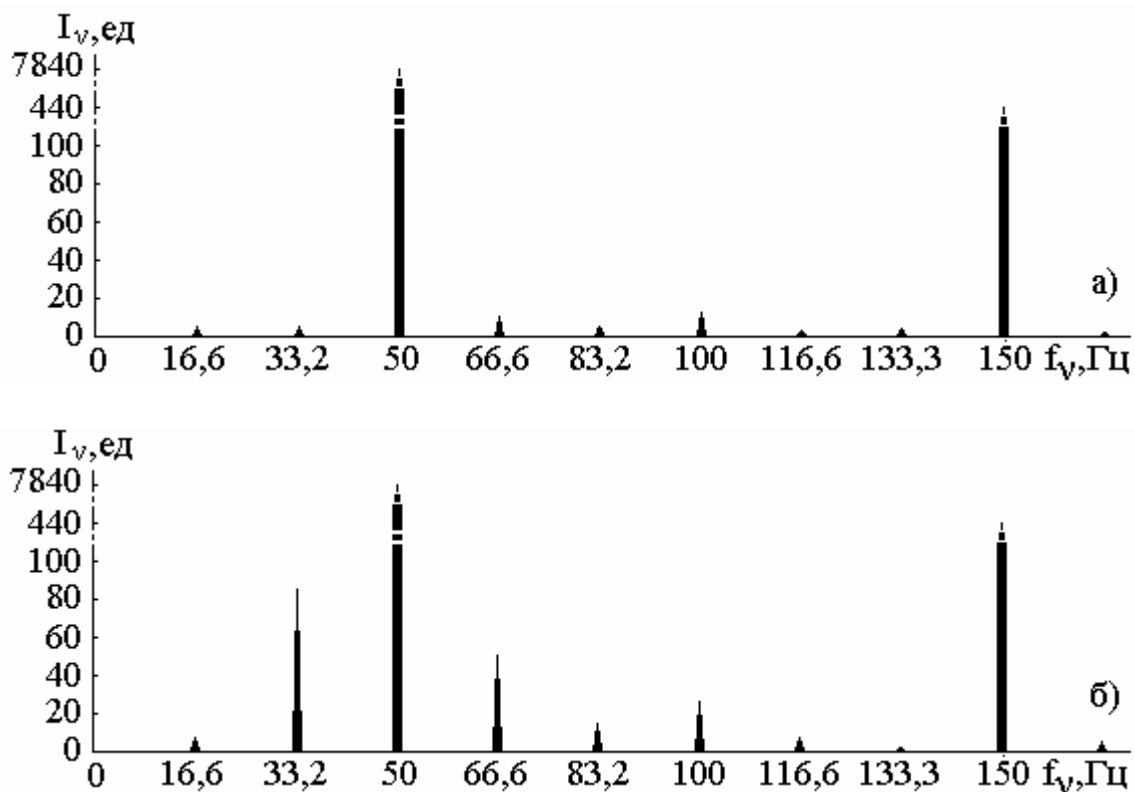


Рисунок 2.3 Спектр тока I_1 АД АО-41-6 в режиме холостого хода при эксцентриситете $\varepsilon = 0$ (а) и $\varepsilon = 0,95$ (б).

Таблица 2.1

$\varepsilon, \text{о.е.}$	Величины гармонических $I_{v\pm 1/p}$ с частотой $f_{v\pm 1,p}$ в единицах						
	16,66 Гц	33,33 Гц	66,66 Гц	83,33 Гц	116,66 Гц	153,33 Гц	166,66 Гц
0,00	4,38	4,51	10,52	5,69	2,94	3,97	2,06
0,25	2,98	15,33	5,97	8,3	1,13	2,09	1,72
0,5	2,1	37,56	20,2	9,66	3,67	3,61	5,66
0,75	6,77	49,35	44,08	2,2	2,62	2,05	4,03
1,00	7,47	85,11	51,01	14,46	6,82	1,88	4,43

Из этого становится ясно, что использовать в качестве диагностического признака эксцентриситета ротора составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p} \div I_{vn\pm 1/p}$ можно. Однако при этом неясно, какую из них использовать для диагностики. Для выяснения этого необходимо исследовать влияние на составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p} \div I_{vn\pm 1/p}$ различных факторов.

2.3 Причины погрешностей измерений

Как показали многочисленные эксперименты на АД различных типов, осуществляемых по блок-схеме на рисунке 2.2, причиной возникновения составляющих $I_{v\pm 1/p}$ дополнительного тока могут являться вибрации АД и приводного механизма, неравномерность момента сопротивления его нагрузки, а также колебания напряжения и частоты сети. Если в качестве АЦП используется ЗК [94], то определенное влияние на их величину при измерении и преобразовании $I_{1\phi}$ оказывают шумы ЗК и различного вида наводки в ПК и схеме измерений.

От вибрации АД и приводного механизма, а также от неравномерности момента сопротивления нагрузки в значительной мере можно избавиться, если диагностировать АД в режиме холостого хода. Поэтому их влияние на дополнительные токи в дальнейшем не рассматриваются.

Величины $I_{v\pm 1/p}$ от шумов АЦП и различного вида наводок получаются путем измерений по схеме на рисунке 2.2 при отключенном АД, то есть при $I_{1\phi} = 0$. Оценка их величин осуществляется по осциллограмме $I_{\text{ацп}}(t)$ и спектрограмме на рисунке 2.4.

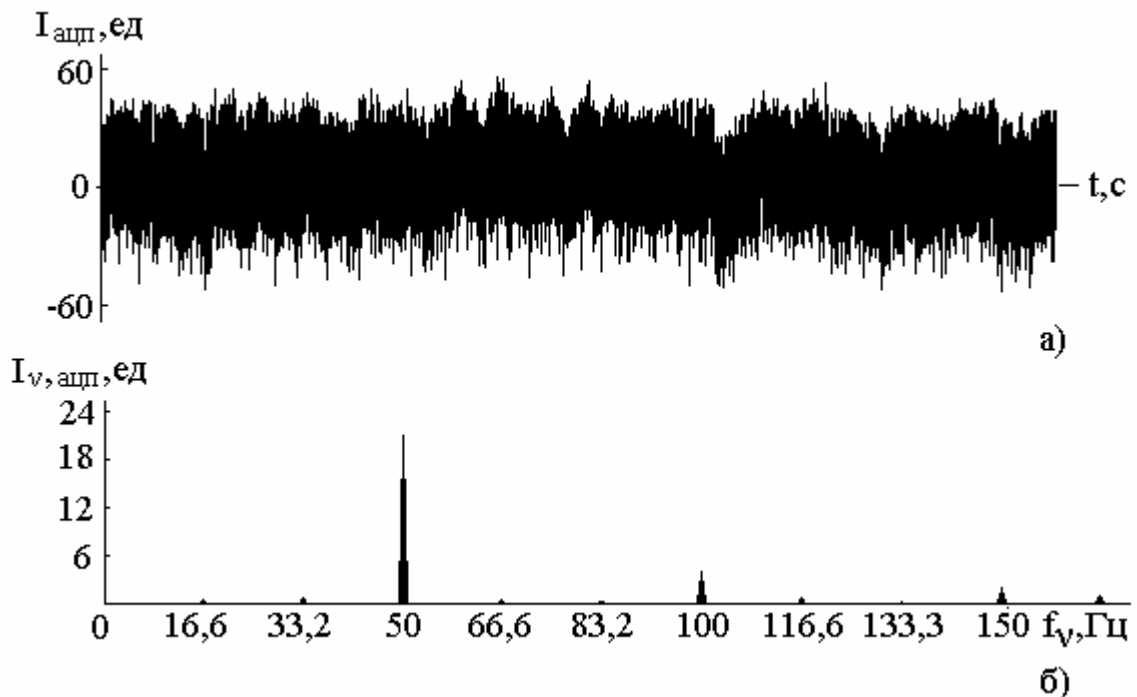


Рисунок 2.4. Осциллограмма и спектрограмма шумов ЗК типа Realtek ALC202(A) и наводок НУ.

Шум в ЗК ПК возникает из-за электрических процессов в элементах её схемы. В соответствии [94] каждому типу ЗК соответствует свой уровень шумов. Так у ЗК типа Realtek ALC202(A) величина $I_{\text{ацп}}$ составляет примерно

10-50 единиц. А у ЗК типа Conexant Cx20585 ноутбука Toshiba Satellite L750 только 1-2 единицы. Спектрограмма $I_{v, \text{ацп}}(f_v)$ ЗК типа Realtek ALC202(A) приведена на рисунке 2.4,б, а величины $I_{v \pm 1/p}$ внесены в таблицу 2.2. Очевидно, что использование для создания системы диагностики эксцентриситета ротора ноутбука с ЗК типа Conexant Cx20585 дает столь малые величины I_v и $I_{v \pm 1/p}$, что их можно не учитывать.

Таблица 2.2

Причина возникновения дополнительных токов	Величины гармонических $I_{v \pm 1/p}$ с частотой $f_{v \pm 1/p}$ в единицах						
	16,66 Гц	33,33 Гц	66,66 Гц	83,33 Гц	116,6 Гц	133,3 Гц	166,6 Гц
Шумы ЗК	1,5	1,1	1,17	1,25	1,07	1,0	0,22
Мелкие множественные броски U сети	2,85	14,22	25,9	8,88	0,65	1,69	0,16
Крупные одиночные броски U сети	10,1	14,36	35,21	9,7	7,14	5,74	1,63

Величину и частоту колебаний напряжения в сети и тока фазы АД, из-за хаотичности поведения многочисленных ее элементов, прогнозировать очень сложно. С другой стороны предельно допустимые их значения регламентируются соответствующими стандартами [96], отдельные положения которых более полно изложены в [97]. Детальное изучение колебаний напряжения в сети и тока фазы АД, а также величин дополнительных токов при этом требует более глубокого исследования, что невозможно осуществить в рамках этой работы. Поэтому рассматривается упрощенный вариант этих процессов.

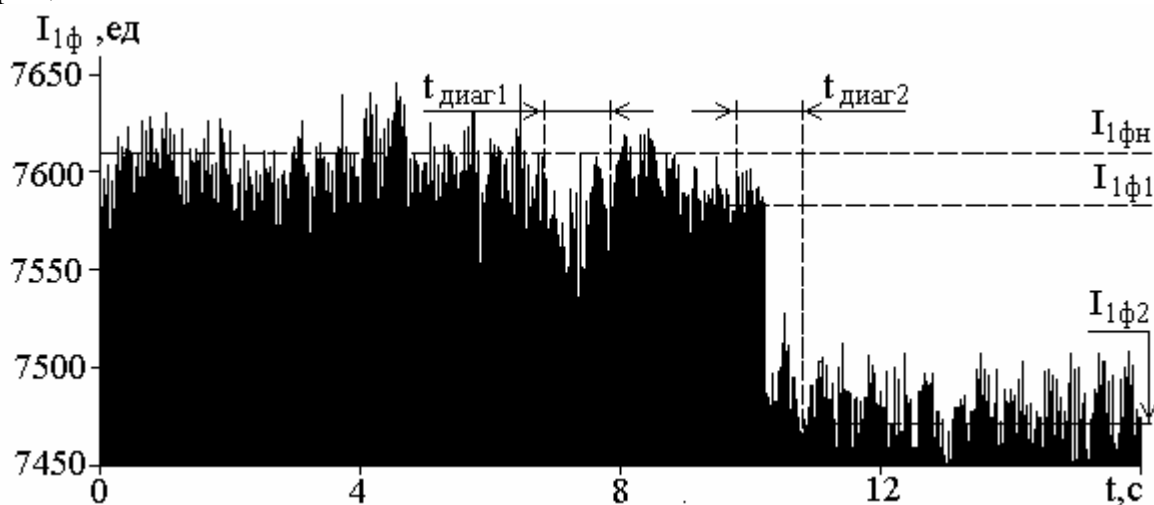


Рисунок 2.5. Осциллограмма тока $I_{\text{ацп}}$ АД АО-41-4

Реально изменяемая амплитуда тока статора $I_{1\phi}$ при изменении напряжения U_{ϕ} сети АД АО-41-6 в течение 20 секунд, приведена на осциллограмме рисунка 2.5. Если эту осциллограмму, с учетом рисунка 2.4,а, избавить от шумов ЗК и наводок, то становится ясно, что за время $t_{\text{диаг}}$, необходимое для диагностики эксцентриситета ротора, ток $I_{\text{ащп}}$ может испытывать многочисленные мелкие, одиночные большие и длительные колебания. Кроме того, следует считаться с изменением гармонического состава и частоты сети. Оценка влияния каждого из этих факторов на величины составляющих дополнительного тока $I_{v\pm l/p}$ осуществляется следующим образом.

Многочисленные мелкие колебания напряжения электрической сети и тока АД вызваны изменением нагрузки из большого числа потребителей малой мощности. Их амплитуда невелика и по данным рисунка 2.5 составляет не более $\Delta U = 0,3-0,5\%$. Ориентировочные значения величины дополнительных токов при этом можно получить из спектрограммы на рисунке 2.6, полученной для времени диагностики $t_{\text{диаг1}}$ на рисунке 2.5. Результаты разложения также внесены в таблицу 2.2.

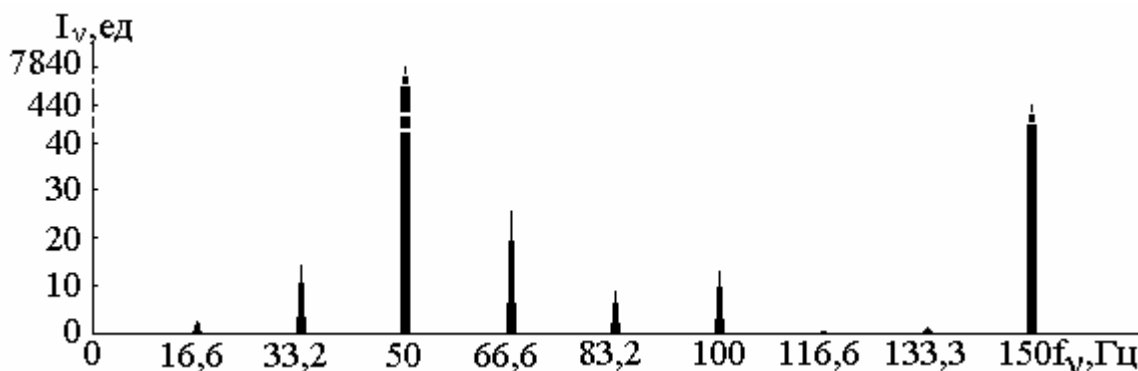


Рисунок 2.6. Спектрограмма мелких множественных колебаний напряжения.

Под одиночным большим колебанием напряжения понимается резкое изменение напряжения, которое происходит один раз за время диагностики $t_{\text{диаг2}}$ как это показано на рисунке 2.5. В соответствии с [95,96], одиночные и быстрые изменения напряжения вызываются резким изменением состава сети или нагрузки из мощных потребителей. При этом изменение напряжения в изменении тока статора сети в процентах определяется как

$$\Delta I_{1\phi} = \frac{I_{1\phi1} - I_{1\phi2}}{I_{1\phi1}} 100\%, \quad (2.13)$$

где $I_{1ф1}$ и $I_{1ф2}$ - текущее значение тока до и после скачка напряжения.

Оценка влияния ΔI на величины составляющих дополнительного тока осуществляется по спектрограмме на рисунке 2.7 полученной при времени диагностирования $t_{\text{диагн2}}$ на рисунке 2.5. При этом ΔI составило порядка 1,84%. Результаты разложения такого колебания напряжения также внесены в таблицу 2.2. Сопоставление спектрограмм на рисунках 2.6 и 2.7 показывает, что величины составляющих дополнительного тока от многочисленных мелких и одиночных крупных скачков при $\Delta I \leq 1,84\%$ отличаются незначительно и могут считаться одинаковыми.

Следует добавить, что наличие скачка с $\Delta I \geq 1,84\%$ во время диагностирования $t_{\text{диагн2}}$ легко выявляется. Что дает возможность осуществлять диагностику АД в тот период времени, когда такие скачки отсутствуют.

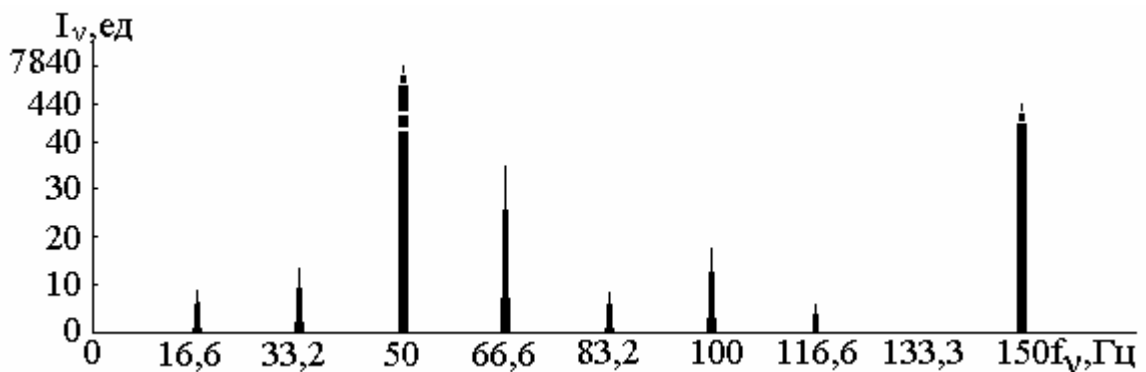


Рисунок 2.7. Спектрограмма одиночного крупного скачка напряжения.

Из (1.14) ясно, что составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$ с частотами $f_{v\pm 1/p}$ по величине жестко привязаны гармоникам I_v тока статора АД. В свою очередь гармоники сети обусловлены, как правило, нелинейными нагрузками пользователей электрических сетей, подключаемыми к электрическим сетям. В связи с тем, что нагрузка сети и ее состав постоянно меняются, то величины составляющих дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$ также будут меняться. Прогнозировать эти изменения практически невозможно. Одним из выходов, который позволит избежать значительных погрешностей при измерении этих токов является их коррекция в виде

$$I_{v\pm 1/p, \text{корр}} = I_{v\pm 1/p} I_v^* / I_v, \quad (2.14)$$

где $I_{v\pm 1/p}$ - измеренная составляющая дополнительного тока в момент диагностики;

I_v и I_v^* - измеренное в момент диагностики и эталонное значения тока гармоник.

Примером длительного колебания напряжения в сети может служить перепады напряжения в суточном и сезонном графике. Они происходят медленно. Поэтому во время $t_{\text{диагн}}$ диагностирования их можно считать постоянными, В этом случае при незначительной погрешности получения составляющих дополнительного тока можно прибегнуть к их коррекции, как это осуществлено в (2.14).

В соответствии с [96,97] максимальное отклонение частоты от номинала в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,4\text{Гц}$ в течение 100% времени интервала в одну неделю. Скорость ее изменения за короткие интервалы времени не рассмотрена. Поэтому можно воспользоваться нормативом изменения частоты напряжения $\pm 0,4\text{Гц}$ за время диагностики $t_{\text{диаг1}}$.

Скорость изменения частоты напряжения в нормальном режиме работы энергосистемы с мощными синхронными генераторами ограничена массой их роторов, которая значительна. Поэтому за время диагностики $t_{\text{диаг1}}$ в несколько секунд погрешностями измерения составляющих дополнительного тока можно пренебречь. При больших значениях $t_{\text{диаг1}}$ колебания частоты следует учитывать за счет совершенствования методов обработки сигнала. В аварийных ситуациях скорость изменения частоты напряжения в энергосистеме значительно выше. Однако такие условия возникают редко и происходят так быстро, что осуществить диагностику за это время невозможно.

Таким образом, из анализа причин и величин искажения информации, результаты которого приведены в таблице 2.2, становится ясно, что основным фактором, ограничивающим возможности системы диагностики эксцентриситета ротора, являются многочисленные мелкие колебания напряжения в сети. Влияние на погрешность измерения составляющих дополнительного тока уровня напряжения сети можно откорректировать. Влияние изменения частоты сети учитывается специальными методами обработки информационного сигнала.

2.4 Выводы

1. Чаще всего для выявления повреждений ротора АД при стационарном сигнале используется метод быстрого преобразования Фурье, а при нестационарном сигнале - метод оконного преобразования Фурье.

2. Появление эксцентриситета ротора АД вызывает модуляцию магнитного поля воздушного зазора и сопровождается появлением составляющих дополнительного тока с частотами $f_{v\pm 1/p} = f_1 / p[pv \pm 1]$, которые могут использоваться в качестве диагностического признака повреждения

3. Рост эксцентриситета ротора АД не всегда сопровождается ростом всех составляющих дополнительного тока с частотами $f_{v\pm 1/p} = f_1 / p[pv \pm 1]$ из-за

колебания параметров напряжения сети питания АД, вибраций АД и нагрузки, что значительно усложняет выбор диагностических признаков.

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОБ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЕ РОТОРА

3.1 Метод искусственных нейронных сетей

Чаще всего в качестве диагностического признака эксцентриситета ротора используют одну из составляющих дополнительного тока фазы АД $I_{v\pm 1/p}$ с частотами $f_{v\pm 1/p}$ [10, 19, 92, 93, 98]. Выделение этой составляющей дополнительного тока осуществляют, например, с помощью преобразования Фурье [18]. Однако, как показывают многочисленные эксперименты на АД различных типов, величины составляющих дополнительного тока при фиксированном значении эксцентриситета не постоянны во времени, а увеличение эксцентриситета не всегда сопровождается их ростом. Все это вызвано колебанием частоты сети, вибрациями АД и неравномерностью момента сопротивления его нагрузки, а также неточностью выбора периода разложения при определении величин этих дополнительных гармонических с помощью преобразования Фурье.

Именно этим и определено отсутствие простого и надежного способа получения и обработки информации для выявления наличия эксцентриситета ротора в АД при неявно изменяющихся параметрах диагностических признаков.

Значительная часть этих проблем отпадает, если диагностирование осуществлять в режиме холостого хода, а для формирования диагностического признака повреждения использовать не только все составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$ с частотой $f_{v\pm 1/p}$ [10], но и соседние с ними токи $I_{v\pm 1/p \pm \Delta f_v}$ с частотами $f_{v\pm 1/p \pm \Delta f_v}$, где Δf_v - шаг разложения по частоте. Что позволит представлять составляющие диагностического признака эксцентриситета ротора в виде $I_{cp,m} = (I_{v-1 \pm \Delta f_v} + I_{v \pm \Delta f_v} + I_{v+1 \pm \Delta f_v})/3$, в котором m количество составляющих [99]. Такой подход к формированию диагностических признаков резко снижает влияние колебаний частоты сети и неточности определения $T_{расч}$ на результат диагностики.

Для диагностирования смещения ротора следует использовать несколько составляющих диагностического признака $I_{cp,m}$, а для распознавания образа эксцентриситета ротора АД использовать искусственную нейронную сеть (ИНС).

Зависимость величин составляющих дополнительного тока от величины эксцентриситета ротора при $\Delta f_v = 0,2 \text{ Гц}$ можно оценить по рисунку 3.1 и данным таблицы 3.1. Из них видно, что рост эксцентриситета ротора действительно не всегда приводит к увеличению величины дополнительных гармонических с частотами $f_{v\pm 1,p}$.

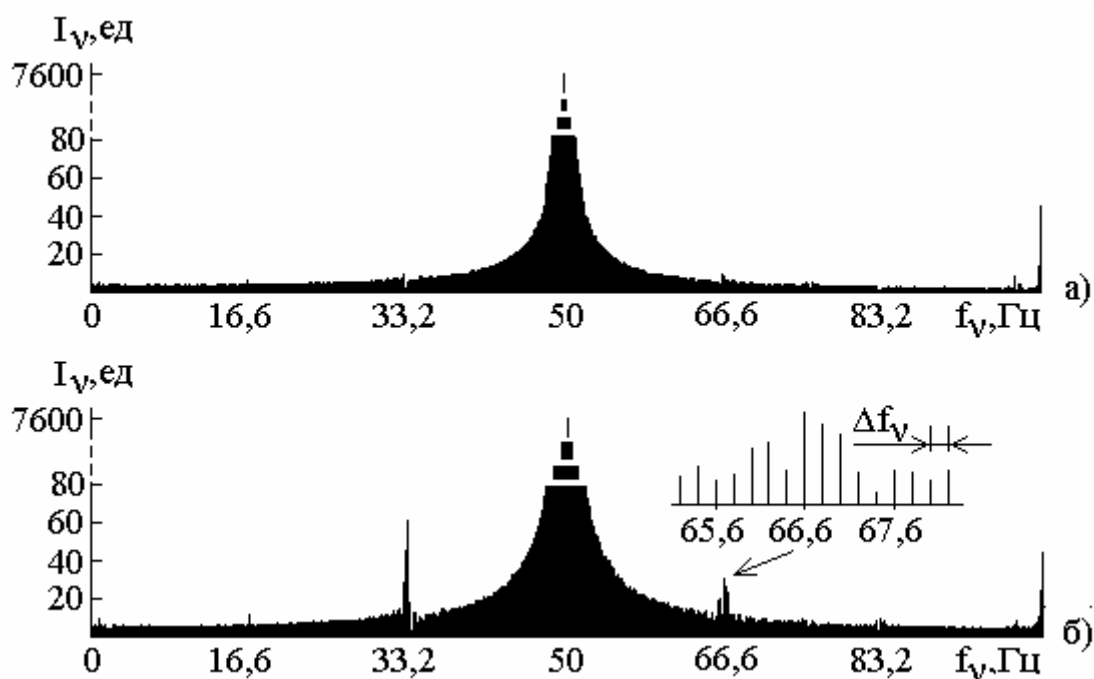


Рисунок 3.1 Спектрограммы тока фазы АД АО-41-6 в режиме холостого хода при отсутствии (а) и при наличии (б) эксцентриситета ротора.

Следует добавить, что данные $I_{v\pm 1/p}$ на рисунке 3.1 и в таблице получены на АД АО-41-6 при работе в режиме холостого хода.

Таблица 3.1

ε , о.е.	Диагностические признаки $I_{cp,m} = (I_{v-l\pm\Delta f_v} + I_{v\pm\Delta f_v} + I_{v+l\pm\Delta f_v})/3$		
	$I_{cp,1}$ (16,6Гц), ед.	$I_{cp,2}$ (33,3Гц), ед.	$I_{cp,3}$ (66,6Гц), ед.
0	$\frac{4,2 + 4,1 + 4,0}{3} = 4,1$	$\frac{10,0 + 3,0 + 5,5}{3} = 6,17$	$\frac{4,0 + 9,8 + 8,1}{3} = 7,3$
0,25	$\frac{5,1 + 5,5 + 4,5}{3} = 5,03$	$\frac{2,4 + 22,5 + 12,4}{3} = 12,4$	$\frac{9,8 + 16 + 9,5}{3} = 11,77$
0,5	$\frac{4,3 + 3,9 + 4,7}{3} = 4,3$	$\frac{12,4 + 33 + 14,6}{3} = 20$	$\frac{13,6 + 34 + 9,8}{3} = 19,13$
0,75	$\frac{6,6 + 7,1 + 7,0}{3} = 6,9$	$\frac{28 + 44 + 11}{3} = 27,67$	$\frac{7 + 31 + 9}{3} = 15,67$
1,00	$\frac{5,8 + 7,4 + 6,0}{3} = 6,4$	$\frac{46 + 63 + 17}{3} = 42$	$\frac{12 + 30,4 + 26,4}{3} = 22,9$

Для распознавания образа эксцентриситета ротора при неявно изменяющихся признаках в наибольшей степени подходит модель многослойного перцептрона Румельхарта [100,101].

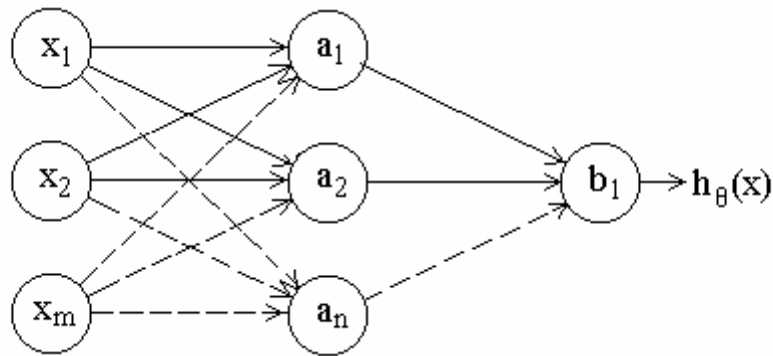


Рисунок 3.2 – Образец структуры ИНС с одним выходом

Модель многослойного перцептрона показана на рисунке 3.2. Он состоит из входного слоя, образуемого нейронами $x_1 \div x_m$, скрытого слоя с нейронами $a_1 \div a_n$, а также выходного слоя с одним нейроном b_1 . Число входных нейронов определено числом диагностических признаков, то есть величиной m . Нейроны входного и скрытого слоев взаимосвязаны между собой однонаправленными связями с коэффициентами $\theta_{nm}^{(1)}$, где n - номера нейронов скрытого слоя. Нейроны скрытого и выходного слоев взаимосвязаны между собой аналогичными связями с коэффициентами $\theta_{1n}^{(2)}$.

Диагностирование эксцентриситета ротора АД с помощью ИНС осуществляется с использованием следующих положений:

1. Наличие эксцентриситета ротора АД определяется по величине

$$\Delta b = b_{1д} - b_{1н}, \quad (3.1)$$

где $b_{1н}$ и $b_{1д}$ - величины нейрона выходного слоя в режимах настройки и диагностики.

2. Коэффициенты связи первого слоя $\theta_{nm}^{(1)}$ равны между собой, а их величина выбирается исходя из максимума изменения b_1 при фиксированном изменении $x_1 \div x_m$.

3. Коэффициенты связи второго слоя $\theta_{1n}^{(2)}$ определяются аналогично.

4. Для обеспечения одинаковой чувствительности к изменениям нейронов $x_1 \div x_m$ в режиме настройки их значения принимают равными единице. Разница между величиной нейрона в режиме настройки и диагностики учитывается коэффициентом k_m приведения, который определяется как:

$$k_m = 1/I_{cp,m}. \quad (3.2)$$

В результате, в режиме диагностики величины входных нейронов

$$x_m = k_m I_{cp,m}. \quad (3.3)$$

В режимах настройки и диагностирования величины нейронов скрытого слоя определяются из математических выражений

$$a_1 = g(z_1^{(1)}), a_2 = g(z_2^{(1)}) \text{ и } a_n = g(z_n^{(1)}), \quad (3.4)$$

а величину выходного нейрона определяю как

$$b_1 = h_\theta(x) = g(z_1^{(2)}), \quad (3.5)$$

где $g(z)$ - активационная функция.

Согласно [101] в подобных задачах используется сигмоидное преобразование. Однако с учетом (3.3) для данной конкретной задачи предпочтительней активационная функция в виде:

$$g(z) = k_z z, \quad (3.6)$$

где $k_z = g/z = 0,1$. Они показаны на рисунке 3.3 линиями 1 и 2.

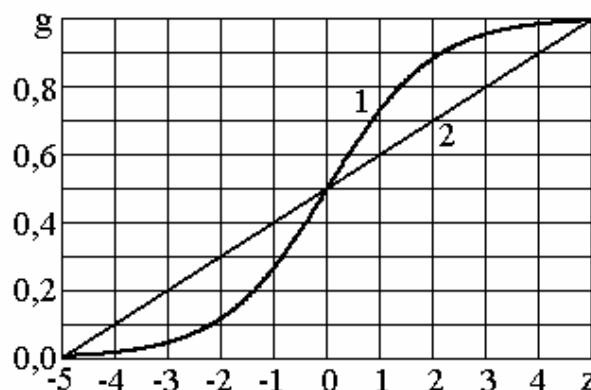


Рисунок 3.3 Используемая активационная функция

В выражениях (3.4) аргументы активационной функции определяются как

$$\begin{aligned} z_1^{(1)} &= \theta_{11}^{(1)} x_1 + \theta_{12}^{(1)} x_2 + \dots + \theta_{1m}^{(1)} x_m; \\ z_2^{(1)} &= \theta_{21}^{(1)} x_1 + \theta_{22}^{(1)} x_2 + \dots + \theta_{2m}^{(1)} x_m; \\ &\dots \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$z_n^{(1)} = \theta_{n1}^{(1)} x_1 + \theta_{n2}^{(1)} x_2 + \dots + \theta_{nm}^{(1)} x_m,$$

а для выражения (3.5)

$$z_1^{(2)} = \theta_{11}^{(2)} a_1 + \theta_{12}^{(2)} a_2 + \dots + \theta_{1n}^{(2)} a_n. \quad (3.8)$$

В режиме настройки системы диагностики значения k_m , $\theta_{nm}^{(1)}$, $\theta_{ln}^{(2)}$ и b_{ln} запоминаются. Диагностирование АД осуществляется через определенный период времени или в случае аварийной ситуации. При диагностировании по полученным значениям тока статора $I_{cp,t}$ и сохраненным ранее параметрам k_m , $\theta_{nm}^{(1)}$, $\theta_{ln}^{(2)}$ и b_{ln} определяется значение b_{ld} , а также $\Delta b = b_{ld} - b_{ln}$, по величине которого судят о величине эксцентриситета ротора АД.

Экспериментальная проверка особенностей использования ИНС для выявления эксцентриситета при неявных диагностических признаках проводилась на АД типа АО-41-6 в режиме холостого хода. В качестве диагностических признаков использовались данные из таблицы.

Выявление наличия и величины эксцентриситета ротора экспериментального АД осуществлялось ИНС с тремя входными, тремя скрытыми и одним выходным нейронами. Коэффициенты связи $\theta_{nm}^{(1)}$ и $\theta_{ln}^{(2)}$ первого и второго слоя принимались равными сорока. В режиме настройки нейроны $x_1 \div x_m$ считались равными единице. В режиме диагностики они определялись по выражению (3.3). Величина эксцентриситета ротора АД находилась как разность величины нейрона выходного слоя в режимах диагностики и настройки, то есть как Δb .

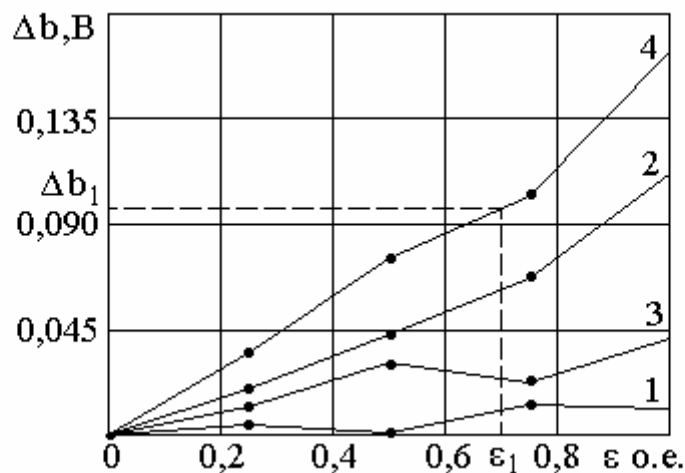


Рисунок 3.4 – Зависимость величины сигнала на выходе ИНС от эксцентриситета ротора АД АО-41-6

Зависимости $\Delta b(\varepsilon)$ ИНС при изменении одного из диагностических признаков $x_1 \div x_3$ из таблицы в виде линий 1 ÷ 3 приведены на рисунке 3.4. Так, линия 1 на нем построена при $x_1(\varepsilon) = k_1 I_{cp,1}$, а $x_2 = x_3 = 1$. Линии 2 и 3 строились аналогично. Линия 4 получена при изменении всех диагностических признаков одновременно.

Анализ результатов моделирования $\Delta b(\varepsilon)$ на рисунке 3.4 показывает, что выявить эксцентриситет ротора можно и по одному диагностическому признаку. В АД АО-41-6 для этого следует использовать, например, второй диагностический признак в виде линии 2. Однако, при этом остается неясным у какого АД какой диагностический признак для этого использовать. В тоже время одновременное использование всех, наиболее значимых диагностических признаков практически всегда способно обеспечить надежное выявление наличия эксцентриситета ротора.

3.2 Метод математического критерия в виде действующего значения дополнительного тока

С учетом [8,10,18,99] и раздела 1.2 действующее значение тока статора АД при эксцентриситете ротора можно представить в виде

$$I_{1\phi} = I_{1\phi n} + I_{1\phi d}, \quad (3.9)$$

где $I_{1\phi n}$ и $I_{1\phi d}$ - действующие значения номинального тока статора АД без эксцентриситета ротора и дополнительного тока статора, появляющегося при эксцентриситете ротора.

В соответствии с разделом 2.2 составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$ имеют частоту $f_{v\pm 1/p}$. Полученные экспериментально зависимости токов $I_{v\pm 1/p}(\varepsilon)$ при смещении одной из опор ротора можно оценить по данным таблицы 2.1.

Как показано в разделе 3.1, величины составляющих дополнительного тока при фиксированном значении эксцентриситета не постоянны во времени. При этом увеличение эксцентриситета не всегда сопровождается их ростом. Поэтому предлагается распознавать эксцентриситет ротора по нескольким составляющим дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$, а в качестве диагностического признака использовать действующее значение дополнительного тока [18]. В результате

$$I_{1\phi d} \approx \sqrt{I_{1+1/p}^2 + I_{1-1/p}^2 + I_{2+1/p}^2 + I_{2-1/p}^2 + \dots + I_{v+1/p}^2 + I_{v-1/p}^2}. \quad (3.10)$$

На практике при определении $I_{1\phi д}$ можно использовать 7-15 слагаемых, так как остальные имеют незначительную величину. Результаты расчета $I_{1\phi д}$ по данным таблицы 2.1 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

$\varepsilon, \text{о.е.}$	Величины гармонических $I_{v\pm 1/p}$ с частотой $f_{v\pm 1/p}$ в единицах							$I_{1\phi д}$
	16,66 Гц	33,33 Гц	66,66 Гц	83,33 Гц	116,66 Гц	153,33 Гц	166,66 Гц	
0,00	4,38	4,51	10,52	5,69	2,94	3,97	2,06	14,53
0,25	2,98	15,33	5,97	8,3	1,13	2,09	1,72	18,89
0,5	2,1	37,56	20,2	9,66	3,67	3,61	5,66	44,44
0,75	6,77	49,35	44,08	2,2	2,62	2,05	4,03	66,75
1,00	7,47	85,11	51,01	14,46	6,82	1,88	4,43	100,7

С целью учета влияния на $I_{v\pm 1/p}$ колебаний напряжения и частоты сети диагностирование АД предлагается осуществлять в два этапа, то есть в режимах «Настройка» и «Диагностика». Следует добавить, параметры, измеряемые в режиме «Настройка», далее будут помечены знаком *.

В режиме «Настройка» на исправном двигателе измеряется и фиксируется ток статора $I_{1\phi}(t)$. Затем с помощью метода преобразования Фурье определяется токи I_v его гармоник и дополнительные токи $I_{v\pm 1/p}$. Затем эти токи и зависимость $I_{1\phi д} = f(\varepsilon)$ для этого типа АД вносятся в базу данных ПК, на котором осуществляется диагностирование. Эти данные в режиме «Диагностика» используют в качестве эталона.

Напряжение сети, а, следовательно, $I_{1\phi}$ ток статора, в режимах настройки системы и диагностики АД, как правило, различны. Поэтому измеренные величины $I_{v\pm 1/p}$ требует коррекции. Если допустить, что напряжение сети пропорционально току первой гармоники I_1 , то тогда в режиме «Диагностика» в АД измеряется и фиксируется ток статора $I_{1\phi}(t)$, определяются его гармоники I_v и составляющие дополнительного тока $I_{v\pm 1/p}$, а затем по отношению I_v^*/I_v и математическому выражению (3.10) определяется величина $I_{1\phi д}$ как

$$I_{1\phi д} = \sqrt{\frac{I_1^*}{I_1} I_{1+1/p}^2 + \frac{I_1^*}{I_1} I_{1-1/p}^2 + \frac{I_2^*}{I_2} I_{2+1/p}^2 + \frac{I_2^*}{I_2} I_{2-1/p}^2 + \dots + \frac{I_v^*}{I_v} I_{v+1/p}^2 + \frac{I_v^*}{I_v} I_{v-1/p}^2} \quad (3.11)$$

Далее по действующему значению дополнительного тока $I_{1\phi д}$ и зависимости $I_{1\phi д} = f(\varepsilon)$, как показано на рисунке 3.5 находится величина эксцентриситета ротора ε , а также формируются решение о дальнейшей эксплуатации АД.

Зависимость $I_{\varepsilon} = f(\varepsilon)$ с высокой точностью может быть получена экспериментально на заводе – изготовителе и поставляться потребителю вместе с АД в виде приложения к его паспортным данным. Для крупных АД со сварным корпусом и подвижными опорами ротора ее легко получить непосредственно на месте использования двигателя путем смещения одной из опор. Для АД АО-41-6 экспериментальная зависимость $I_{1\phi д} = f(\varepsilon)$ на рисунке 3.5 построена по данным таблицы. Ее теоретическое значение при $\varepsilon < 0,25$ показано штриховой линией.

Менее точно зависимость $I_{1\phi д} = f(\varepsilon)$ можно получить расчетным путем с использованием, например, [10,20].

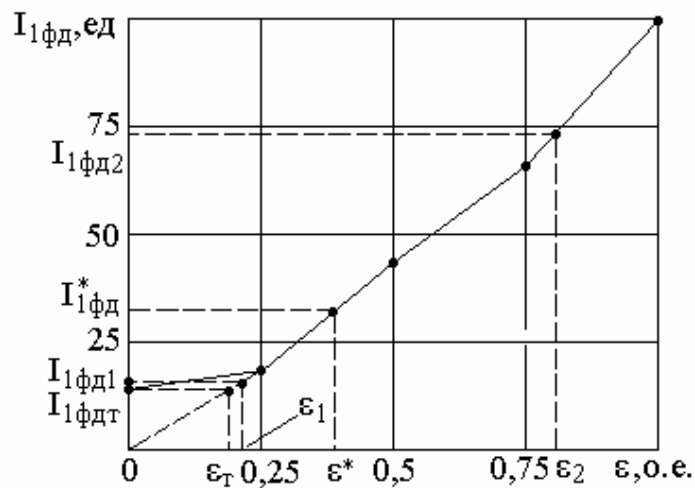


Рисунок 3.5 Критерии для оценки величины эксцентриситета ротора

В качестве критерия оценки величины эксцентриситета ротора и принятия решения о дальнейшей эксплуатации АД предлагается использовать величины ε_1 и ε_2 , которые определяют исходя из значения технологического эксцентриситета ε_T [6]. Под технологическим эксцентриситетом понимается тот эксцентриситет, который АД получает в процессе его изготовления. Для АД с подшипниковыми щитами он является величиной постоянной, так как зависит от точности изготовления статора, ротора и подшипниковых щитов на заводе изготовителе. В общем случае для АД с небольшим зазором [6] можно принять $\varepsilon_T \approx 0,1$.

С учетом технологического эксцентриситета в АД

$$\varepsilon_1 = k_H \varepsilon_T, \quad (3.12)$$

где $k_n=1,2-2,0$ - коэффициента надежности.

В результате для АД АО-41-6 на рисунке 2 $\varepsilon_1 \approx 0,19$.

Другим критерием является величина ε_2 , при превышении которой резко возрастает вероятность задевания ротора за статор с тяжелыми последствиями для АД. С достаточной точностью ее можно определять как

$$\varepsilon_2 = (1 - \varepsilon_1). \quad (3.13)$$

Следовательно, для АД АО-41-6 на рисунке 3 $\varepsilon_2 \approx 0,81$.

Текущая величина эксцентриситета ε в АД определяется по известной зависимости $I_{\text{лфд}} = f(\varepsilon)$ и величине $I_{\text{лфд}}$ из (3.11). Решение о дальнейшей эксплуатации АД с учетом рисунка 2 системой принимается на основе анализа величины ε . Так, при $\varepsilon < \varepsilon_1$ диагностика величины невозможна из-за наличия технологического эксцентриситета. В этом случае считается, что он отсутствует.

При $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$ выдается информация о том, что в АД имеется эксцентриситет ротора, при котором перерасход электроэнергии составляет порядка 0,3-1,5%.

Если $\varepsilon > \varepsilon_2$, то формируется информация о том, что эксцентриситет ротора в АД превышает допустимые нормы и требуется немедленное отключение двигателя, так как резко возросла вероятность задевания ротора за статор.

3.3 Метод оконного преобразования Фурье

Как было показано в разделе 2.1, метод преобразования Фурье наиболее часто используют там, где осуществляется анализ стационарных сигналов. То есть он не подходит для анализа сигналов в электроэнергетике, где переходные процессы, вызываемые колебаниями частоты и напряжения в сети [96,97] являются обычным явлением. В этом случае следует пользоваться методом оконного преобразования Фурье (STFT) [70-74].

В соответствии с [102] в методе оконного преобразования Фурье используются прямоугольные весовые окна постоянного размера. Применительно к диагностике эксцентриситета ротора и с учетом с рисунка 3.6 оптимально принимать величину ширины окна равную $t_{\text{ок}} = t_{\text{ок1}} = t_{\text{ок2}} = \dots = t_{\text{окn}} = t_p m$, где t_p - время одного периода синусоидального сигнала; $m = 1, 2, 3 \dots$. То есть при частоте 50Гц в окне размещается целое число периодов сигнала тока, кратное p . Наилучшее разрешение по частоте при построении спектрограмм в виде зависимостей $I_v(n)$ достигается при $m = 1$.

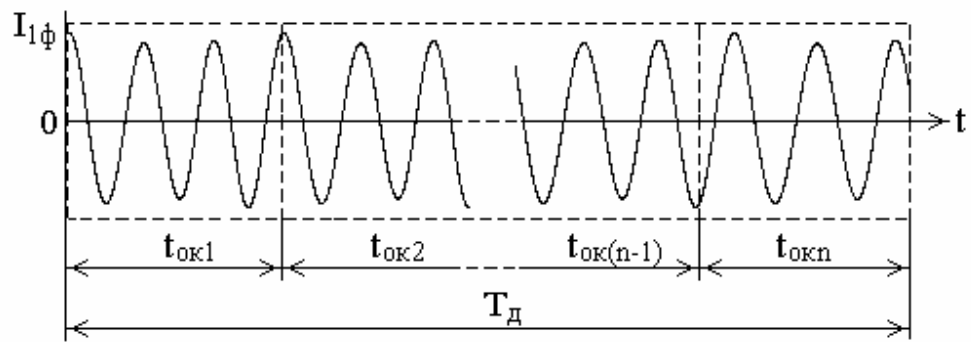


Рисунок 3.6 - Размещение окон при оконном преобразовании Фурье сигнала $I_{1\phi}$ для АД с $p = 3$

Пример построения экспериментальных зависимостей $I_{v\pm 1/p}(n)$ для АД АО-41-4 при эксцентриситет $\varepsilon = 0,95$ и $m = 4$ приведен на рисунке 3.7, где гармонические составляющие тока статора $I_{1\phi}$ с частотами $f_{v\pm 1/p} = 33,34\text{Гц}$, 50Гц и $66,67\text{Гц}$ обозначены как 1-3, причем составляющая 50Гц представлена в виде $(I_1(n) - 7650)\text{ед}$.

Из рисунка 3.7 видно, что по спектрограммам легко выявить время и длительность различных воздействий на АД со стороны питающей сети, зону сигнала, где отсутствуют эти воздействия, а также среднюю величину $I_{v,ср}$ за время диагностирования. Для данного случая этот переходной период составляет порядка $0,72\text{с}$, время диагностирования $3,84\text{с}$ при среднем значении составляющих тока $I_{1\phi}$ равным $I_{33.34,ср} = 53,5\text{ед}$, $I_{50,ср} = 7837\text{ед}$ и $I_{66.67,ср} = 53,5\text{ед}$.

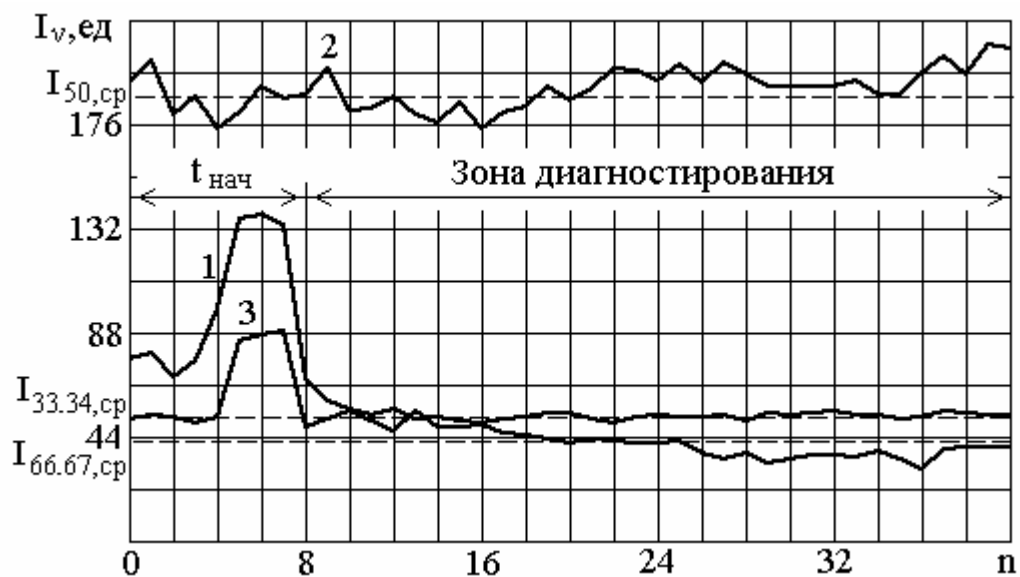


Рисунок 3.7 Спектрограммы тока статора $I_{1\phi}$ при эксцентриситете ротора $\varepsilon = 0,95$ АД АО-41-4

Эффективность выявления внешних воздействий на большое количество составляющих дополнительного тока с частотами $f_c(v \pm 1/p)$ можно оценить по рисунку 3.8.

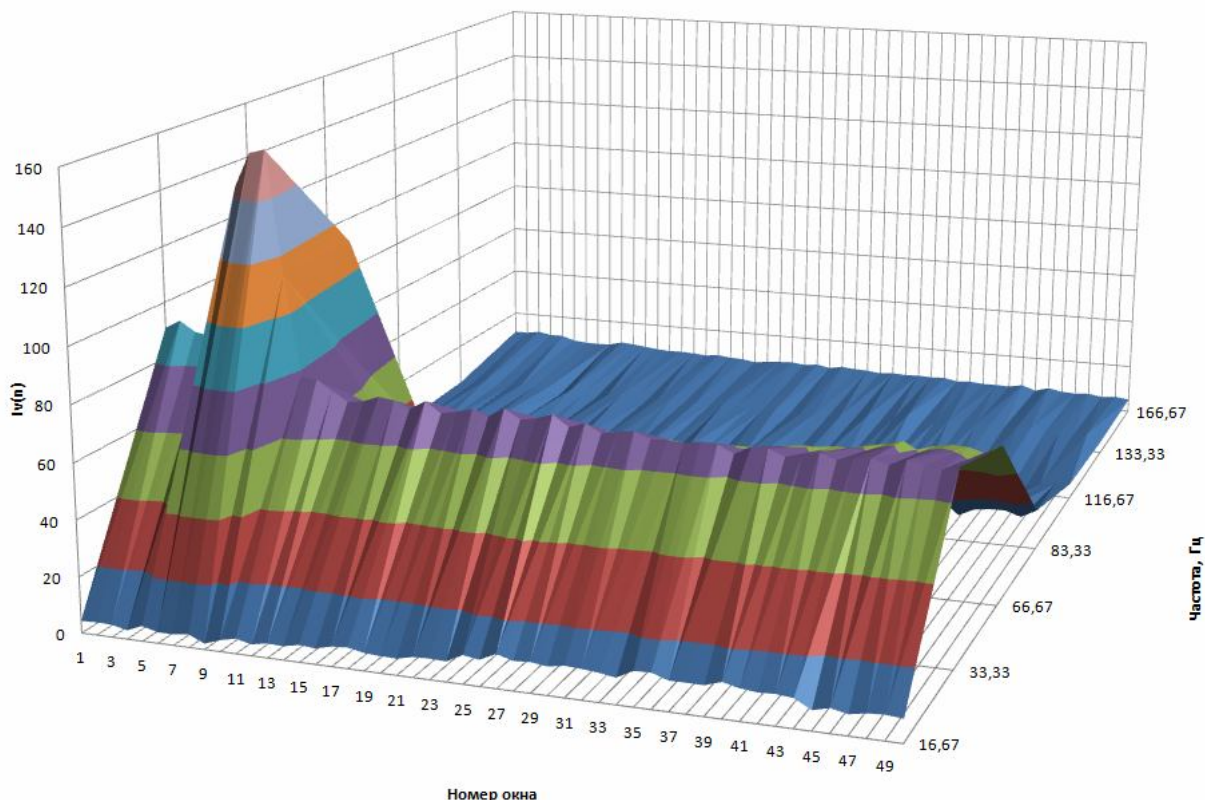


Рисунок 3.8 Спектрограмма составляющих дополнительного тока I_{1fd} для АД АО-41-6 при $\varepsilon=0,95$.

Определение зон различного рода воздействий, зоны диагностирования и средних значений составляющих тока $I_{1ф}$ по спектрограммам можно осуществлять по разному. Чаще всего это выполняется с помощью разложения полученных спектрограмм в ряд Фурье и выделения постоянной составляющей или етодом контроля постоянства вов времени математического ожидания полученной спектрограммы.

Таким образом, из рисунков 3.7 и 3.8 становится ясно, что применение метода оконного преобразования Фурье с фиксированной шириной окна достаточно легко решает проблему временной локализации некоторого рода воздействий на исходный сигнал, выявления диагностических признаков повреждения и определения их величины.

Однако колебания частоты $f_c(t)$ основной гармонической тока статора АД приводит к тому, что в прямоугольном весовом окне фиксированного размера размещается не целое число периодов сигнала тока. Что сопровождается значительными погрешностям измерения $I_{v \pm 1/p}(f)$ с

частотами $f_c(v \pm 1/p)$ из-за явления Гиббса, называемого также «растеканием» спектра. Для того, чтобы выяснить влияние этого явления на точность диагностики рассмотрим пример диагностирования эксцентриситета ротора для АД с $p = 3$. При этом при эксцентриситете ротора $\varepsilon = 0,95$ ток статора синусоидален с величиной первой гармоники в 100ед и дополнительными гармоническими с частотами $I_{50(1 \pm 1/p)}$ - 1,5ед. Предположим, что частота сети неизменна и равна 50Гц. Ширина весового окна $t_{ок} = t_p m$, где $m = 1$. Таким образом в него помещается целое число периодов тока статора. Этому сигналу при использовании метода оконного преобразования соответствует спектр тока на рисунке 3.9.а и спектрограмма дополнительных токов на рисунке 3.9,б, где линиями 1,2 показаны токи с частотами 33,34 Гц и 66,67 Гц.

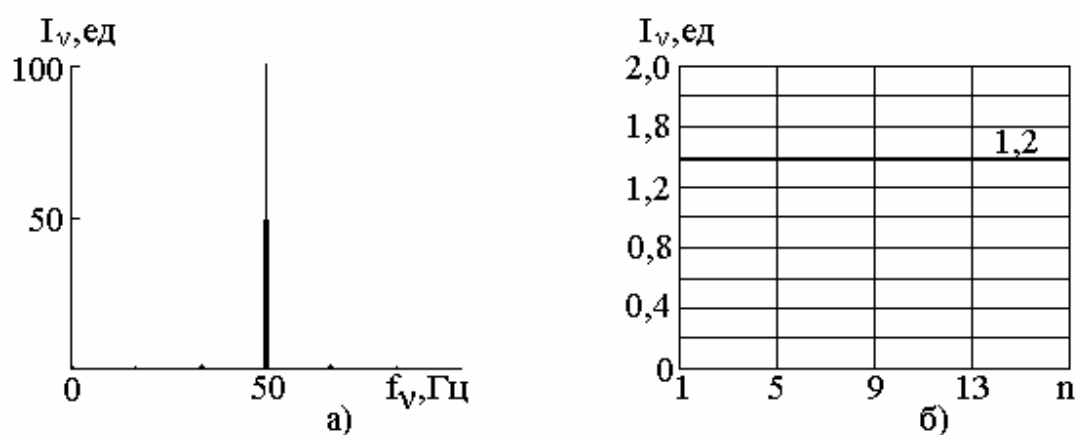


Рисунок 3.9 Оконное преобразование сигнала с постоянным окном при эксцентриситете ротора

Изменение частоты сети [96,97] приводит к тому, что в весовом окне будет размещаться дробное число периодов. Что соответственно вызывает «растекание» спектра сигнала $I_{1\phi}(t)$. В результате при скорости изменения частоты сети 0,2Гц за секунду и отсутствии эксцентриситета ротора спектр тока и спектрограммы составляющих дополнительного тока будут иметь вид, показанный на рисунках 3.10.а и 3.10,б соответственно.

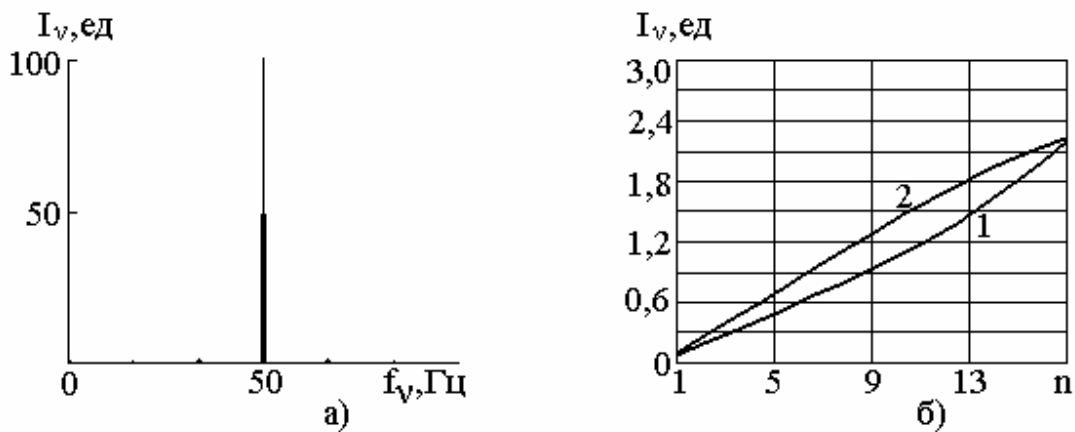


Рисунок 3.10 Оконное преобразование сигнала с постоянным окном при изменении частоты без эксцентриситета

Из рисунка видно, что чем выше отклонение частоты от номинала, тем большая величина составляющих дополнительного тока возникает при разложении из-за явления Гиббса. Так, уже при частоте $f_c = 49,8$ Гц их величина примерно в полтора раза больше чем при наличии эксцентриситета ротора на рисунке 3.9.

Таким образом, использование простого весового окна с фиксированной шириной оказывается неприемлимым для реализации систем диагностики реальных сигналов. В этом случае авторы [62, 102] предлагают заменить прямоугольную оконную функцию более гладкой, спадающей к краям анализируемого интервала.

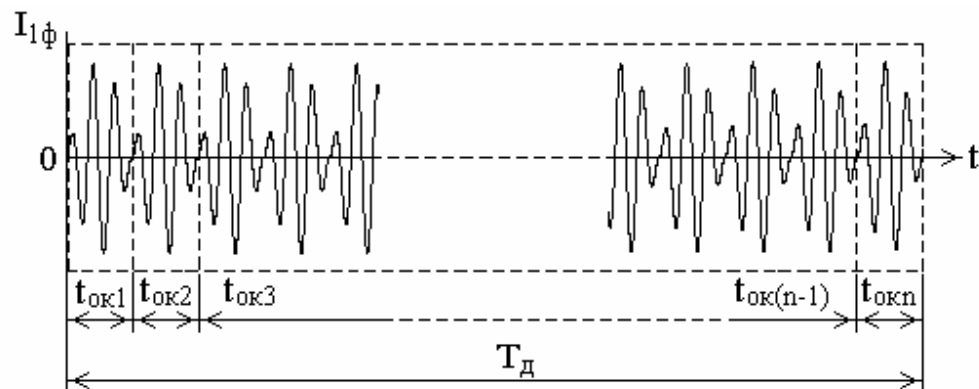


Рисунок 3.11 Преобразование сигнала $I_{1\phi}$ АД с $p = 3$ для синусного окна

В качестве одного из таких окон [102] может использоваться синус-окно. В этом случае при дискретном представлении исходного сигнала его значение в точке n домножается на $\sin(n\pi/n_{ок})$, где $n_{ок}$ - ширина окна в точках. Сигнал после такого преобразования показан на рисунке 3.11.

Эффективность использования синус окна для обработки сигнала в системе диагностики показана на рисунке 3.12.

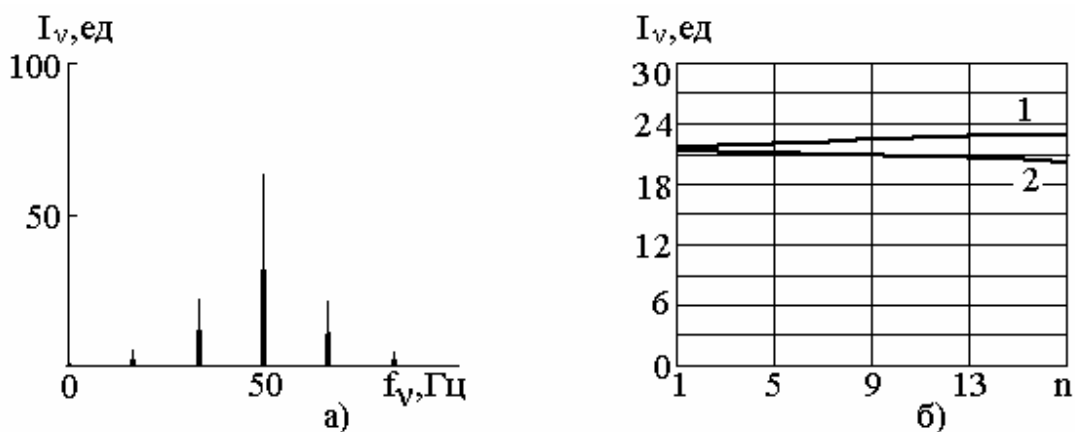


Рисунок 3.12 Оконное преобразование сигнала с синусным окном при изменении частоты

Из этого рисунка видно, что использование синус-окна при изменении частоты сети на 0,2 Гц в секунду не приводит к снижению погрешностей измерения составляющих дополнительного тока. Наоборот они возрастают примерно 8-10 раз.

В качестве другого весового окна использовалось окно Хемминга. В нем при дискретном представлении исходного сигнала его значение в точке n домножается на $0,54 - 0,46 \cdot \cos(2\pi n / n_{\text{ок}})$. Сигнал после такого преобразования показан на рисунке 3.13.

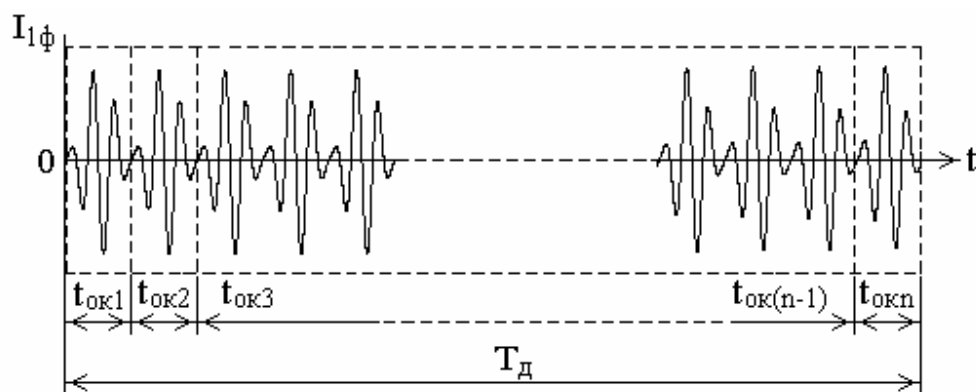


Рисунок 3.13 Преобразование сигнала $I_{1\phi}$ АД с $p = 3$ с использованием окна Хемминга

Возможность использования окна Хемминга для обработки сигнала в системе диагностики можно оценить по рисунку 3.14.

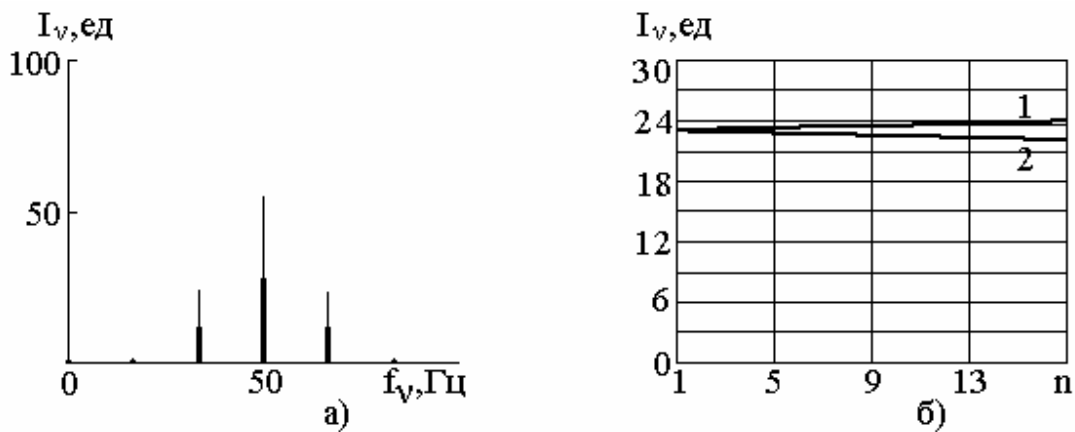


Рисунок 3.14 Оконное преобразование сигнала с окном Хемминга при изменении частоты

Анализ результатов расчета на рисунках 3.10, 3.12 и 3.14 показывает, что использование метода оконного преобразования Фурье с фиксированным размером окна не позволяет создать систему диагностики адекватно реагирующую на колебание частоты сети в пределах, указанных в [96,97], независимо от типа используемого весового окна.

3.4 Оконное преобразование Фурье с «адаптирующимся» окном

Классический метод оконного преобразования Фурье является достаточно популярным в диагностике эксцентриситета ротора благодаря простоте алгоритма. Однако, использование весового окна фиксированного размера независимо от его типа вызывает значительный рост дополнительных гармонических, как показано выше. А потому не может использоваться при реализации систем диагностики эксцентриситета ротора в сетях, где возможно колебание частоты сети во времени [96,97].

Для решения этой проблемы, возникающий на этапе обработки сигнала, предлагается использовать метод оконного преобразования Фурье с адаптирующейся шириной окна [103]. В дальнейшем он будет называться метода оконного преобразования Новожилова – Крюковой.

Предлагаемый вариант метода оконного преобразования Фурье [103] заключается в том, что нестационарный временной сигнал $I_{1\phi}(t)$, длительностью T_d при наличии колебаний частоты сети делят на сегменты в виде прямоугольных окон, как показано на рисунке 3.15.

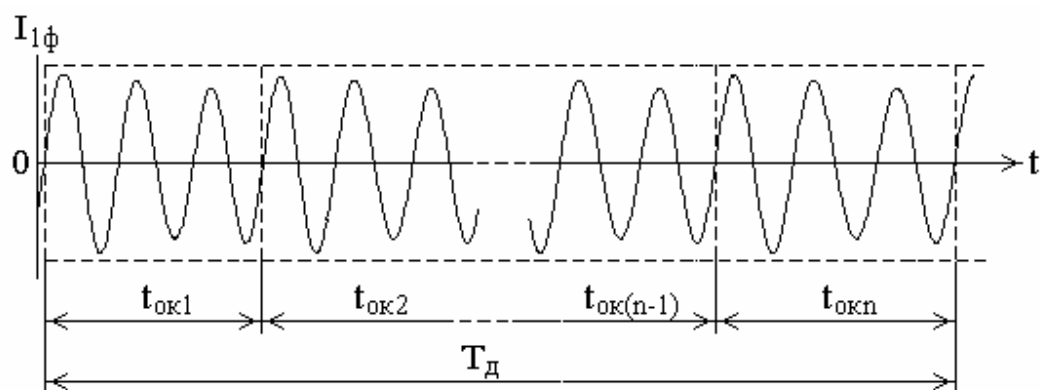


Рисунок 3.15 Оконное преобразование Фурье нестационарного сигнала с применением прямоугольного окна с адаптирующей шириной

Ширина $t_{окn}$ n -о окна принимается равной целому числу периодов $I_{1φ}(t)$. То есть ширина n -о окна $t_{окn} = pmt_p(t)$ независимо от колебаний частоты контролируемого сигнала. С учетом этого $t_{ок} \neq t_{ок1} \neq \dots \neq t_{окn}$, где t_p - время одного периода синусоидального сигнала в зависимости от момента измерения; $m = 1, 2, 3 \dots$. То есть в окне всегда размещается целое число периодов тока, кратное p . Таким образом, весовое окно становится «адаптирующимся», но в пределах окна частота считается постоянной. Наилучшее разрешение при построении спектрограмм в зависимостях $I_v(n)$ также достигается при $m = 1$. При построении зависимостей $I_v(n)$ ширины колонок графиков этих зависимостей следует принимать пропорциональными ширинам соответствующих окон. Затем, в случае необходимости, осуществляется переход от зависимости $I_v(n)$ с переменным окном к этой зависимости от времени. Таким образом осуществляется переход от временного сигнала к частотно-временному, что в известной мере позволяет анализировать временные изменения спектрального состава нестационарного сигнала. При этом адаптирующаяся ширина окна позволяет резко снизить эффект «растекания» спектра, особенно при малой его ширине.

При дискретном представлении сигнала определение ширины произвольного весового окна осуществляется по методу нулевых точек. В этом методе точки перехода осциллограммы $I_{1φ}(t)$ через ось t определяется по критерию существования двух рядом стоящих значений $I_{1φ}$ с отрицательным и положительным значениями.

На рисунке 3.15 приведен пример смоделированного сигнала тока, представленного математическим выражением:

$$I_{1φ}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{I_{d1m}}{2} \sin\left((\omega + \frac{\omega}{p})t\right) + \frac{I_{d1m}}{2} \sin\left((\omega - \frac{\omega}{p})t\right), \quad (3.14)$$

где I_{lm} и I_{dlm} - амплитудное значение тока основной гармоники сети и составляющих дополнительного тока, появляющихся при эксцентриситете ротора.

Так как представление $I_{l\phi}(t)$ на рисунке 3.15 дискретно, то величина угловой скорости сети при колебании частоты сети со скоростью 0,2 Гц за одну секунду представляется как

$$\omega = 2\pi f_c (1 - 0,004 \cdot t / T_d) \quad (3.15)$$

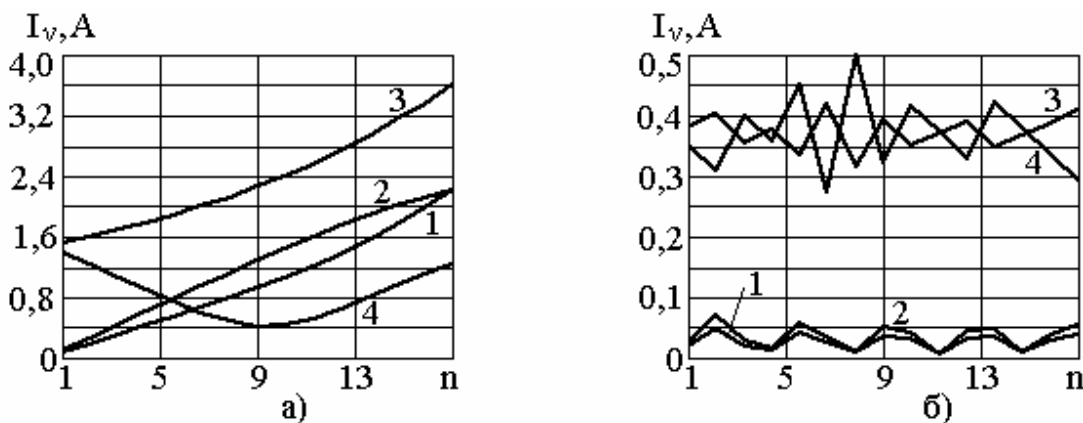


Рисунок 3.16 Оконное преобразование нестационарного сигнала с простым постоянным и адаптирующим весовым окнами

Зависимости $I_{v\pm 1/p} = f(n)$ полученные при использовании метода оконного преобразования Фурье с постоянным и «адаптирующимся» окном преведены на рисунках 3.16,а и 3.16,б соответственно, где цифрами 1 и 2 они показаны для частот 33,67Гц и 66,7Гц исправного АД, а цифрами 3 и 4 - при эксцентриситете ротора. Следует добавить, что при необходимости спектрального анализа $I_{v\pm 1/p} = f(n)$ ширину n -го столбца на графиках рисунка 3.16 принимают пропорциональной ширине соответствующего окна.

Из этих рисунков видно, что при колебаниях частоты сети использование для анализа тока статора метода оконного преобразования с «адаптирующимся» окном дает значительно меньшее «растекание» спектра, чем при таком же анализе с постоянной шириной окна. Это подтверждается уменьшением составляющих дополнительного тока с частотами 33,67Гц и 66,7Гц при отсутствии эксцентриситета ротора примерно в 2÷3 раза и большей стабильностью величины этих токов при эксцентриситете ротора.

В последнее время особую популярность в диагностике электрических машин приобретает вейвлет-анализ [75-80]. Чаще всего его используют для выявления динамического эксцентриситета ротора и обрывов стержней «беличьей клетки» ротора [89]. Анализ возможностей этого метода показывает что он наиболее эффективен при обнаружении локального повреждения, которое перемещается вдоль воздушного зазора. Кроме того, его можно

использовать для выявления колебаний параметров сети питания АД и его нагрузки.

3.5 Выводы

1. Искусственная нейронная сеть позволяет с достаточной для диагностики точностью выявить наличие и величину эксцентриситета ротора АД по результатам измерения нескольких составляющих дополнительного тока.

2. Использование искусственной нейронной сети с постоянными коэффициентами связи θ и линейной активационной функцией $g(z) = k_z z$ показало, что выявить наличие и величину эксцентриситета ротора АД можно путем использования взвешенной суммы выбранных диагностических признаков.

3. Использование для диагностирования режимов настройки и диагностики, а также действующего значения дополнительного тока и зависимости $I_{\text{фд}} = f(\varepsilon)$ позволяет однозначно выявлять не только наличие, но и величину эксцентриситета ротора.

4. Метод оконного преобразования Фурье с фиксированным размером окна не позволяет разработать систему диагностики эксцентриситета ротора, адекватно реагирующую на колебание частоты сети независимо от типа используемого весового окна.

5. Метод оконного преобразования Фурье с адаптирующимся окном позволяет надежно отстроиться от значительных колебаний частоты питаемого АД напряжения, что наряду с коррекцией величины составляющих дополнительного тока при диагностике дает возможность разработать систему диагностики эксцентриситета ротора с чувствительностью, способную удовлетворить большую часть потребителей.

4 СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА СО ВСТРОЕННОЙ ЗВУКОВОЙ КАРТОЙ

4.1 Особенности использования звуковой карты в качестве аналого-цифрового преобразователя

Одним из основных элементов практически любой системы микропроцессорной диагностики электрических машин реализуемой на ПК является АЦП. От его характеристик во многом зависят селективность и чувствительность диагностической системы в целом. Среди профессиональных АЦП [94,105,106] легко найти образцы с необходимыми характеристиками, но высокая стоимость сдерживает их массовое применение. Для решения этой проблемы можно воспользоваться АЦП встроенной звуковой карты ПК. Однако, при реализации системы диагностики с применением ЗК возникает ряд проблем, связанных с несовершенством характеристик данного устройства. К ним следует отнести различие в величине максимального значения входного напряжения и учёт смещения выходного сигнала, неравномерность амплитудно-частотной характеристики и уровень шума, частота дискретизации и погрешность измерения напряжения при дискретизации. Для исследования этих характеристик использовалось программное обеспечение «Елена 2012».

Линейный вход у ноутбука отсутствует, а микрофонным входом располагают все ПК. Атенюация сигналов по этому входу ЗК осуществляется программным путем. Так как точную аттенюацию сигналов на входе таким путем осуществлять сложно, то уровень входного сигнала в системе Windows при диагностике следует устанавливать на максимум. Подключение ПК к источнику информации осуществляется по схеме на рисунке 2.2.

В связи с особенностями схемного решения и программного обеспечения ЗК независимо от ее стандарта синусоидальное напряжение U_{ny} на осциллографе системы «Елена 2012» имеет вид кривой на рисунке 4.1, где U_{m2+} и U_{m2-} - положительное и отрицательное значение амплитуды осциллограммы сигнала на экране; $U_{см}$ - напряжение смещения; $U_{сз}$ - напряжение среза. Следует добавить, что все напряжения в окне осциллографа на экране монитора ПК измеряются в единицах, которые являются шагом квантования напряжения АЦП.

Из осциллограммы видно, что предельное измеряемое значение амплитуды сигнала равно $U_{сз}$. При напряжении $U_{m2} < U_{сз}$ амплитуду сигнала и напряжение смещения определяют как

$$U_{ny} = \frac{U_{m2+} - U_{m2-}}{2} \text{ и } U_{см} = \frac{U_{m2+} + U_{m2-}}{2}. \quad (4.1)$$

Напряжение $U_{сз}$ определено разрядностью ЗК и сопутствующим программным обеспечением (драйвер ЗК, медиаконтейнер, функции Windows FPI), которые определяют параметры записи и хранения аудиоинформации. В зависимости от типа ЗК напряжение среза

$$U_{c3} = 32767 k_1,$$

где k_1 - коэффициент, зависящий от типа кодека.

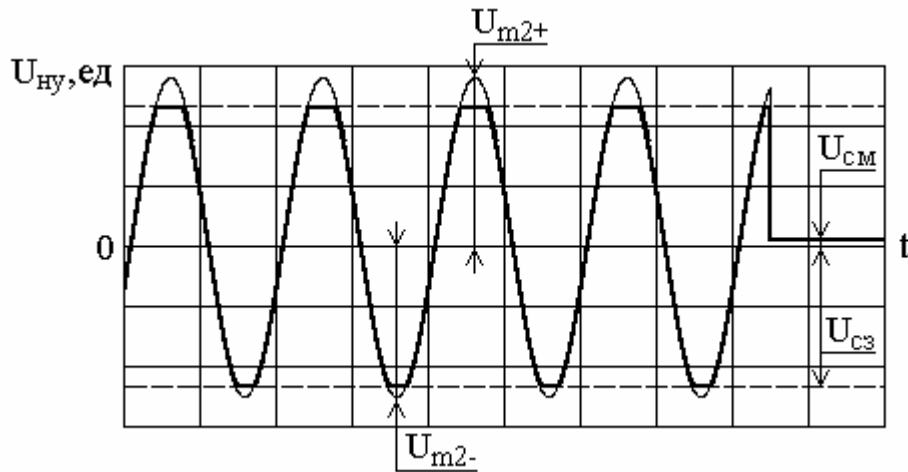


Рисунок 4.1 Осциллограмма сигнала на экране ПК

Так у лабораторного осциллографа ПК с ЗК типа Realtek ALC202(A), коэффициент k_1 оказался равным 0,5. При использовании Notebook Toshiba Satellite L750 с ЗК типа Conexant Cx20585 $k_1=1$. Таким образом, максимальный размах амплитуды выходного сигнала на осциллографе может составлять 16383 и 32767 единиц квантования АЦП соответственно.

Величины U_{c3} амплитуда выходного сигнала достигает при подаче на микрофонный вход ЗК напряжения $U_{m1,c3}$. Каждая ЗК имеет свою величину $U_{m1,c3}$. Так у лабораторного ПК с кодеком типа Realtek ALC202(A) $U_{m1,c3}=0,108$ В. Поэтому реализацию системы диагностики на новом ПК следует начинать с экспериментального определения величин U_{c3} и $U_{m1,c3}$.

При известных значениях U_{c3} и $U_{m1,c3}$ единица квантования АЦП ЗК в вольтах

$$\Delta U_{зк} = U_{m1,c3} / U_{c3} (\text{В}). \quad (4.2)$$

Как показали измерения и расчеты для лабораторного ПК с ЗК типа Realtek ALC202(A) единица квантования АЦП составила 6,6 мкВ, а для ноутбука Toshiba Satellite L750 с ЗК типа Conexant Cx20585 - 9,4 мкВ.

Сведения о предельно допустимой величине $U_{m1,max}$ на входе ЗК, не приводящие к ее повреждению, весьма противоречивы. Например, при использовании недорогой ЗК на микросхеме Yamaha 724 [107] величина $U_{m1,max}$ должна составлять 0,5В. По данным [105] величина $U_{m1,max}$ может

достигать 10В. Приблизительно оценку предельно допустимой величины $U_{т1, \max}$ на входе ЗК предлагается осуществить следующим образом.

Предельно допустимая величина $U_{т1, \max}$ в значительной степени определена напряжением питания ЗК, исходя из которого выбирают ее элементы. Питание аналоговой части кодеков обычно равно 5В. Однако стандарт AC'97 допускает питание аналоговой части напряжением $U_{ист} = 3,3В$. При этом средняя точка источника питания сдвинута на величину $U_{оп} = 0,5U_{ист}$. Если предположить, что все элементы схемы ЗК рассчитаны на работу при напряжении $U_{оп}$, то надежное функционирование ЗК будет обеспечено при $U_{т1, \max} \approx 0,5U_{оп}$. То есть для ЗК типа ALC202(A) $U_{м1, \max} \approx 0,825 В$.

Так как в системе диагностики в качестве датчика сигнала используется трансформатор тока, то для согласования его сигнала с напряжением $U_{н\psi}$ на входе ЗК применяется нормирующее устройство НУ. Схема одного из вариантов такого устройства приведена на рисунке 4.2.

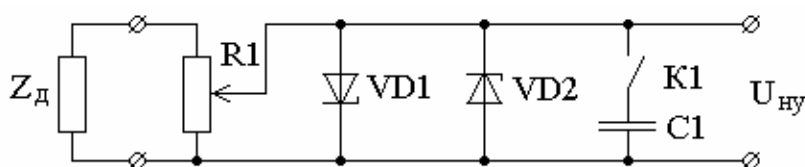


Рисунок 4.2. Нормирующее устройство ЗК

Элементы схемы устройства выбирались из следующих соображений. Полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока $Z_{т2}$ значительно меньше входного сопротивления ЗК и составляет примерно 0,2 Ом. Наибольшей величины отдаваемая датчиком мощность достигает при условии $Z_{д} \approx R1$. Поэтому величина $R1$ принимается равным 0,2 кОм. Напряжение на входе ЗК не должно превышать величины $U_{ип} \approx 0,825В$ при любом положении движка $R1$. Его ограничение предлагается осуществлять диодами $VD1$ и $VD2$ типа КД 209, которые в данном устройстве выступают в виде стабилитронов. Что гарантирует защиту ЗК от перенапряжения.

Смещение осциллограммы относительно сетки на мониторе ПК обусловлено появлением в ней постоянной составляющей, которая измеряется в единицах квантования АЦП. В [108] показано, что параметр DCS (Direct Current Shifting) некоторых встроенных звуковых кодеков может достигать порядка 1000 единиц. Так в ЗК типа Realtek ALC202(A) при установке уровня входного сигнала в системе Windows на максимум величина $U_{см} \approx 186$ ед., а у ноутбука Toshiba Satellite L750 с ЗК типа Conexant Cx20585 $U_{см} \approx 230$ ед. Результаты измерения минимальных и максимальных величин смещения у некоторых типов ЗК приведены в таблице 4.1. Экспериментально выявлено

также, что величина смещения в значительной мере зависит от уровня аттенюации сигнала на входе.

Таблица 4.1

№	Тип звуковой карты	Количество, шт	Смещение, ед	Уровень шумов, ед
1	C-Media AC 97 AD	6	60-75	280-1320
2	Avance AC97 Audio	4	102-347	2-40
3	Realtek AC97 Audio	4	70-401	10-50
4	VIA AC97 Audio	4	6-7	70-198
5	Conexant Cx20585	4	200-250	1-2

При необходимости от этого недостатка легко избавиться, если в обрабатывающей программе ввести блок для определения величины смещения и компенсации его при выводе на экран осциллограммы. В тех системах диагностики, которые при анализе входного сигнала используют разложение в ряд Фурье, можно вообще отказаться от компенсации смещения, так как в этом случае нулевой член ряда однозначно определяет величину смещения сигнала и не влияет на точность гармонического анализа.

Под АЧХ понимается изменение величины U_{m2} в зависимости от частоты подаваемого на вход ЗК гармонического сигнала [107] $U_{m2} = f(f_{зк})$. Как показал ряд исследований, для нужд диагностики электрических машин наибольший интерес представляет данная характеристика в диапазоне частот 0 – 300 Гц включительно. Однако большинство ЗК имеют относительно линейную АЧХ только в области 20 до 20000 Гц [109]. Причем при понижении частоты наблюдается спад АЧХ.

На рисунке 4.3 приведена АЧХ для диапазона частот, использование которого наиболее эффективно при диагностике электрических машин, где линии 1 и 2 были получены при использовании ЗК типа Realtek ALC202(A) с нормирующим устройством на рисунке 4.2 при разомкнутом и замкнутом контакте К1. Из рисунка 4.3 видно, что в этом диапазоне амплитуда сигнала изменяется примерно на 30%. АЧХ и ряд других параметров для некоторых встроенных ЗК приведены в [110].

Улучшить АЧХ ЗК можно по-разному. Например, закоротить входные конденсаторы ЗК или применить нормирующее устройство с использованием корректирующего фильтра. Возможна также коррекция входного сигнала программным путем.

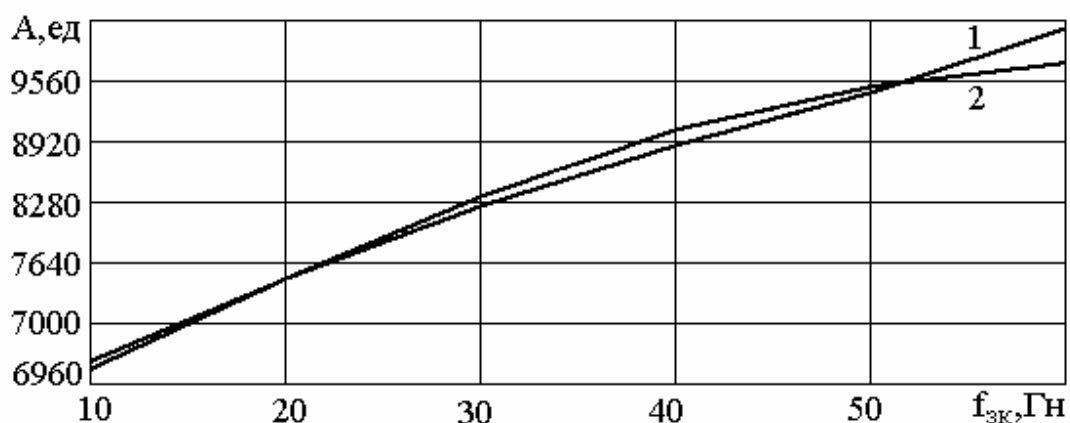


Рисунок 4.3 АЧХ в рабочем диапазоне диагностики электрических машин

Шум ЗК является следствием электрических процессов в элементах её схемы и определяет величину сигнала на выходе ЗК при нулевом сигнале на ее входе. Экспериментально установлено, что его величина не зависит от программного уровня аттенюации входного сигнала. Уровень шума определен только типом ЗК. Его величина для некоторых из них приведена в таблице. Так, максимальное значение осциллограммы шума у ЗК типа Realtek ALC202(A), приведенной на рисунке 4.4, составляет порядка 17 единиц. В тоже время максимальное значение спектра шума, приведенное на рисунке 4.5 вне зависимости от частоты $f_{зк}$ не превышает 0,4 единицы.

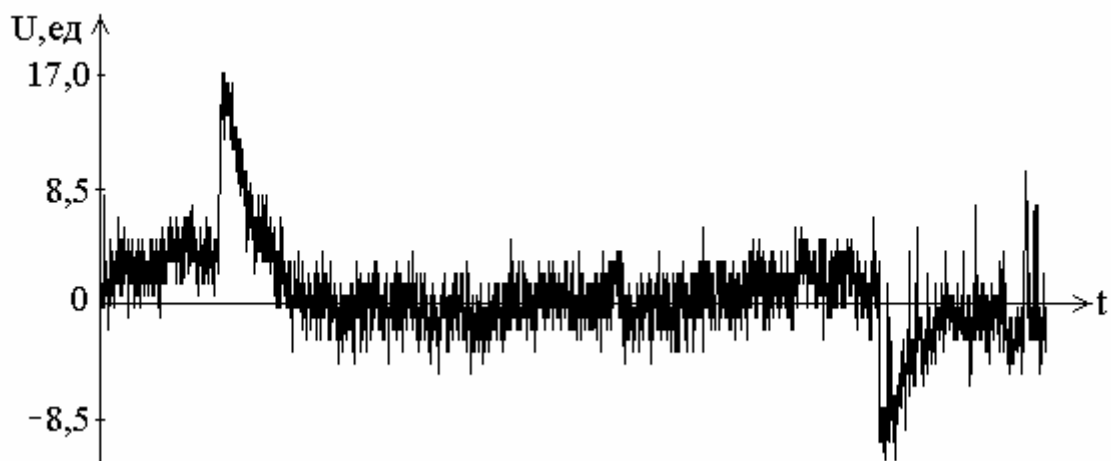


Рисунок 4.4 Шумы ЗК типа Realtek ALC202(A)

Как показали эксперименты, при реализации систем диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя, величина информационного сигнала составляет порядка 450–8000 ед. Таким образом, с учетом рисунка 4.5 вне зависимости от частоты $f_{зк}$ величина шума не превышает 1,6% от величины информационного сигнала в самом неблагоприятном случае. Что не способно существенно повлиять на результаты диагностирования

электрической машины. Для ноутбука Toshiba Satellite L750 с ЗК типа Conexant Cx20585 этот показатель значительно меньше.

Частотой дискретизации называют частоту взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала при его записи в дискретном виде. Именно этот параметр определяет точность получения информации при диагностировании и допустимое время записи сигнала.

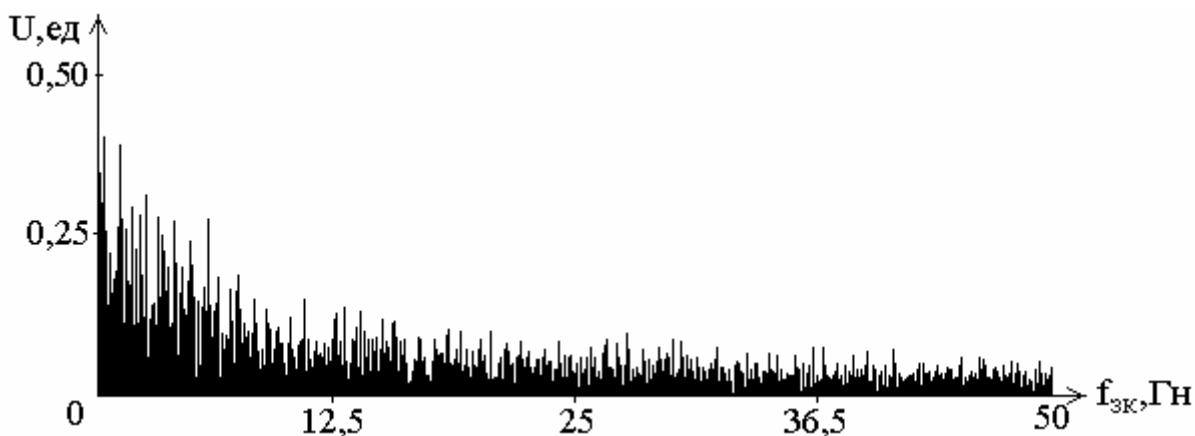


Рисунок 4.5 Спектр шума ЗК типа Realtek ALC202(A)

Преобразование аналогового сигнала в цифровой в звуковой карте происходит с частотой дискретизации до $f_{\text{АЦП}} = 48 \text{ кГц}$ [111]. По результатам исследований программным обеспечением «Елена 2012» выяснено, что запись сигнала без каких-либо сбоев можно осуществлять с постоянной для всех аудиокодеков частотой 32 кГц. Что согласно [112] обусловлено использованием встроенной в Delphi библиотеки MMSystem.dll, предназначенной для работы с мультимедиа-данными.

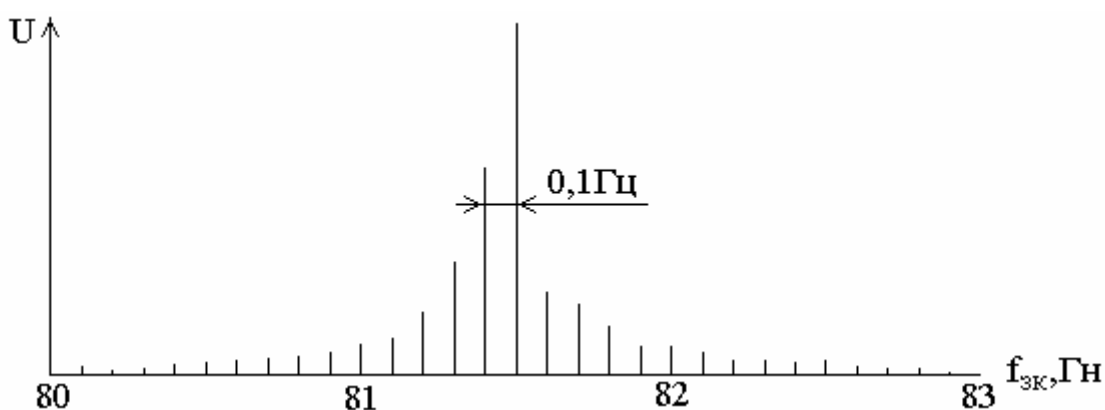


Рисунок 4.6 Фрагмент спектра гармонических, полученных на ПК с ЗК типа Realtek ALC202(A)

Если учесть, что для диагностики электрических машин используется сигнал с частотой не более $f_{\text{max}} = 1000 \text{ Гц}$, то число точек съема информации на один период составляет

$$n_{\text{пер}} = 32000 / f_{\text{max}} = 32000 / 1000 = 32.$$

В тоже время, на один период сигнала с частотой $f_{\text{max}} = 50$ Гц приходится 640 точек. Как показали эксперименты, для четкого выявления информации при диагностировании электрических машин этого более чем достаточно.

Согласно [108] максимальный размер массива переменных в Delphi не должен превышать 2 ГБ. Для хранения одной переменной с плавающей запятой типа «float» отводится 4 байта. Таким образом, при частоте дискретизации 32 кГц массив, необходимый для записи информации в течение 1 секунды, будет равен $4 \times 32000 = 128000 \text{ Б} = 125 \text{ кБ}$. При этом, максимальное время записи сигнала составит более 4,5 часов. Следует отметить, что для нужд диагностики вполне достаточно 2-30 секунд.

Особый интерес представляет шаг спектра частот, получаемых после разложения в ряд Фурье. Он исследовался также с использованием программного обеспечения «Елена 2012». Результаты исследования показывают, что использование встроенной в Delphi библиотеки TChart.pas позволяет обеспечить величину дискретизации спектра частот в $\Delta f = 0,1 \text{ Гц}$.

4.2 Особенности построения системы диагностики

Как было показано выше, а также по результатам многочисленных экспериментов на АД различных типов можно сделать вывод, что основным препятствием для реализации практически любой системы диагностики эксцентриситета ротора является зависимость сигнала тока статора, как основного источника информации о повреждении от колебаний напряжения, частоты и гармонического состава сети, вибраций двигателя и приводного механизма, неравномерности момента сопротивления нагрузки, а также неточности выбора периода разложения при определении величин составляющих дополнительного тока.

То есть отсутствие простых и надежных систем диагностики определено отсутствием способа получения и обработки информации для выявления наличия эксцентриситета ротора в АД при неявно изменяющихся параметрах диагностических признаков. Для решения этих проблем процесс диагностирования эксцентриситета ротора предлагается осуществлять следующим образом.

В качестве источника информации использовать ток статора. Что позволит достаточно просто и без применения дополнительных приборов и устройств с максимальным удобством при диагностике получить информацию о повреждении. Для АД с напряжением выше 1000В местом получения информации служит КРУ, которое показано на рисунке 1,7, а для АД ниже 1000В – сборки с предохранителями или распределительные устройства с магнитными пускателями.

В качестве диагностического признака использовать дополнительный ток статора с составляющими $I_{v \pm 1/p}$, частота которых $f_{v \pm 1/p}$. Для коррекции их

величины в соответствии с изменением тока АД от изменения напряжения в сети используются гармонические тока статора. В этом случае, в соответствии с разделом 3.2, при диагностировании составляющие дополнительного тока представляются в виде $I_{v\pm 1/p} I_v^* / I_v$. Количество составляющих дополнительного тока, используемых для обработки информации о смещении ротора, определено применяемым методом обработки информации. Как правило, выделение составляющих дополнительного тока статора $I_{v\pm 1/p}$ с частотами $f_{v\pm 1/p}$ осуществляется по методу БПФ. Для выявления интервала времени диагностирования используется метод оконного преобразования Фурье или вейвлет-анализ.

Диагностирование эксцентриситета ротора АД следует осуществлять в режиме холостого хода в течение достаточно длительного времени. Это позволит снизить погрешности определения составляющих дополнительного тока статора $I_{v\pm 1/p}$ с частотами $f_{v\pm 1/p}$ от вибраций АД и приводного механизма, неравномерности момента сопротивления его нагрузки, и погрешности в определении периода разложения $T_{расч}$ на точность получения спектрограмм при разложении $I_{лф}(t)$ в ряд Фурье.

Точность определения наличия и величины эксцентриситета ротора АД значительно повышается при использовании зависимости $I_{лфд} = f(\varepsilon)$ диагностируемого двигателя, пример которой приведен на рисунке 3.5. Как показано в разделе 3.2 эту зависимость получают экспериментальным или расчетным путем. Система диагностики должна иметь возможность использовать оба этих варианта.

Безусловно, с высокой точностью зависимость $I_{лфд} = f(\varepsilon)$ может быть получена только экспериментальным путем на заводе – изготовителе. В этом случае по требованию она поставляется потребителю вместе с АД в виде приложения к его паспортным данным или по электронной почте. Для крупных АД со сварным корпусом и подвижными опорами ротора ее легко получить непосредственно на месте использования двигателя путем смещения одной из опор.

При необходимости зависимость $I_{лфд} = f(\varepsilon)$ может быть рассчитана непосредственно системой диагностирования по методике, изложенной в [10], разделу 1.2 и данным конкретного типа АД.

Осуществлять диагностику АД следует в режимах «Настройка» и «Диагностика».

В режиме «Настройка» для каждого исправного АД промышленного предприятия получают и сохраняют в архиве величины гармоник тока статора АД и его дополнительных токов, а также экспериментальную или рассчитанную зависимости $I_{лфд} = f(\varepsilon)$. При этом дополнительные токи используются для расчета критериев при определении области диагностики эксцентриситета ротора на зависимости $I_{лфд} = f(\varepsilon)$, а гармоники тока статора в

В режиме «Диагностика» для диагностируемого АД получают осциллограмму тока статора, величины его гармоник и составляющих дополнительного тока. При этом по отношению гармоник тока статора в режимах «Настройка» и «Диагностика» корректируют величины дополнительных токов и рассчитывают зависимость $I_{1фд}(n)$, n - число окон. Затем по зависимости $I_{1фд}(n)$ выявляется область диагностирования и величина $I_{1фд}$. После этого по $I_{1фд}$ и зависимости $I_{1фд} = f(\varepsilon)$ определяют величину эксцентриситета ротора и принимают решение о дальнейшей эксплуатации АД, как показано в разделе 3.2.

Для снижения влияния на результаты диагностирования АД колебаний напряжения в сети временная зона для диагностирования на осциллограмме выбирается с помощью метода оконного преобразования Новожилова - Крюковой или вейвлет-анализа.

При построении простых и недорогих систем диагностики АД в качестве АЦП можно использовать ЗК [94], а элементы БОС, БОИ, БХИ, БОВЭ, БР и БУ реализуются на базе ПК с соответствующим программным обеспечением. В этом случае с помощью НУ осуществляется согласование сигнала на выходе ТА с допустимым сигналом на входе ЗК [94].

Контроль работы и выбор режима работы системы диагностики, а также ввод всех необходимых технических и электрических данных АД осуществляется с помощью БУ.

Математическим обеспечением БОС является алгоритмы преобразование сигнала, полученного с АЦП методом оконного преобразования Фурье с «адаптирующимся» окном и предоставлением результата в виде величин гармоник I_v тока $I_{1ф}$, составляющих дополнительного тока $I_{vn\pm l/p}$, скорректированных по отношению к их эталонному значению, в зависимости от частоты $f_{vn\pm l/p}$ [18,103] и номера окна. Такие параметры метода оконного преобразования Фурье как, число периодов гармонического сигнала I_1 , помещающихся в окне, время диагностики задаются с помощью БУ или передаются из БХИ. Данные о величине гармоник I_v тока $I_{1ф}$ хранятся в БХИ.

В БОИ в качестве математического обеспечения используется алгоритм расчета действующего значения тока по измеренным данным и полученным из БХИ, или алгебраический критерий определения среднеквадратичной величины составляющих дополнительного тока [18,99]. Иногда для этого используется искусственная нейронная сеть [113-115].

Блок хранения информации представляет собой базу данных, в которой хранится информация о параметрах АД, значениях составляющих дополнительного тока $I_{vn\pm l/p}$ и гармоник тока статора, а также зависимость $I_{1фд} = f(\varepsilon)$ и критерии оценки величины эксцентриситета ротора. Данные заносятся в базу в момент установки нового АД и используются в качестве эталона. Во время диагностики эти данные по мере необходимости поступают в БОС и БОВЭ.

БОВЭ по данным из БХИ и рассчитанному в момент диагностики АД значению I_ε , а также критериям оценки величины эксцентриситета ротора определяет его величину и вырабатывает рекомендации по дальнейшей эксплуатации АД.

Реализация блоков БОС, БОИ, БОВЭ, БХИ и БУ проста и осуществляется в среде «Delphi».

Опытный образец системы диагностики эксцентриситета ротора показал, что такая ее реализация способна достаточно эффективно выявлять статический эксцентриситет ротора в процессе эксплуатации АД. Ее стоимость невысока и определена в основном стоимостью ПК и программного обеспечения, что делает ее доступной для практически любого промышленного предприятия и некоммерческих организаций.

4.3 Программное обеспечение системы диагностики

В соответствии с разделом 4.2 система диагностики эксцентриситета ротора реализуется на базе переносного ПК со встроенной звуковой картой и определенными техническими параметрами. Как правило, этим требованиям отвечает практически любой ПК типа Notebook с установленной объектно-ориентированной средой программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise.

Алгоритм работы системы диагностики эксцентриситета ротора разработанный с учетом блок-схемы на рисунке 4.7 приведен на рисунке 4.8. Для реализации блоков БОС, БОИ, БОВЭ, БХИ и БУ была выбрана интегрированная объектно-ориентированная среда программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise. На сегодня Delphi является одним из самых распространенных средств создания приложений. Эти средства позволяют создавать прикладные программы, предназначенные для работы на ПК под управлением оболочки Windows 98 и более поздних версий, а так же операционной системы Windows NT и использующие общепринятые для Windows элементы пользовательского интерфейса.

Как было показано в разделе 3.2, для надежной диагностики эксцентриситета ротора система диагностики должна использовать два режима работы. Это режимы «Настройка» и «Диагностика». Первый предназначен для ввода всех необходимых сведений данных АД. Они хранятся в памяти ПК и в дальнейшем используются как эталонные. Во втором непосредственно осуществляется диагностика состояния этого АД. Для реализации процесса диагностирования на первом этапе разработки использовалось программное обеспечение «Елена-2014», разработанного на кафедре «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова докторантом Крюковой Е.В. под руководством профессора Новожилова А.Н.. Алгоритм процесса диагностирования приведен на рисунке 4.8.

После запуска программного обеспечения «Елена-2014», пользователю необходимо выбрать один из режимов «Настройка» или «Диагностика».

В режиме «Настройка» осуществляется определение места положения данных по конкретному и исправному АД, куда помещается его тип, место работы, момент установки, ввод электромеханических параметров для определения тока статора при эксцентриситете. Затем вводятся настройки системы в виде времени диагностирования, размера весового окна, количество этих окон и т.д. Далее определяются необходимые для диагностирования гармоники тока и составляющие дополнительных токов, а также их частоты. Одновременно вводятся настройки ЗК такие как «Усиление». Все эти данные помещаются в архив ПК и в дальнейшем используются при диагностировании в качестве эталонных.

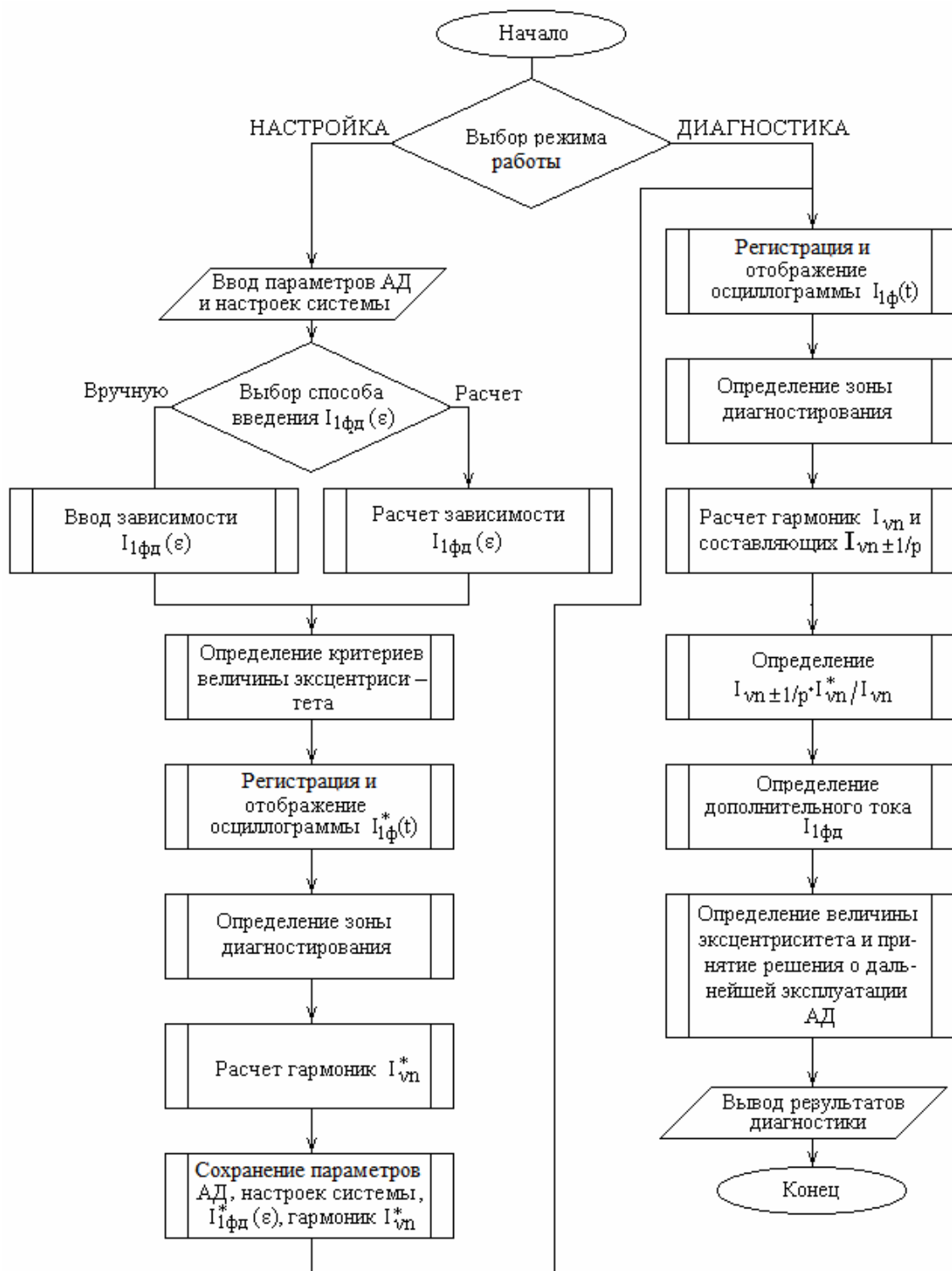


Рисунок 4.8 Алгоритм процесса диагностирования эксцентриситета ротора АД

Затем пользователь осуществляет выбор способа введения эталонной зависимости $I_{1фд}(\epsilon)$. Если выбран ручной режим, то в базу данных для данного типа двигателя вводится двумерный массив значений $[I_{1фд}, \epsilon]$, получаемый экспериментальным путем на заводе изготовителе или непосредственно на

производстве. Этот вариант введения $I_{1\phi d}(\varepsilon)$ обеспечивает более точное и качественное диагностирование эксцентриситета ротора.

Если экспериментальная зависимость $I_{1\phi d}(\varepsilon)$ отсутствует, то пользователь выбирает процедуру расчета этой зависимости по введенным ранее электротехническим параметрам АД.

Процесс регистрации входного сигнала начинается с нажатия кнопки «Пуск», при этом в wav-файл производится запись в файл дискретных данных до тех пор, пока не будет нажата кнопка «Стоп» или автоматически по окончании времени диагностики T_d . Затем при необходимости эта запись в виде осциллограммы $I_{1\phi}(t)$ может выводиться на экран монитора. С помощью указателя мыши можно выделять произвольный временной участок осциллограммы для увеличения масштаба ее просмотра.

Основную рабочую область окна занимает поле графика, по оси абсцисс которого отмеряется время измерения сигнала, а по оси ординат – амплитуда в условных единицах измерения. При работе с двумя сигналами их осциллограммы могут накладываться друг на друга, для решения этой проблемы в программе предусмотрена возможность смещения их в требуемых пределах. Имеется также возможность задавать контрольные уровни амплитуд записываемых сигналов с автоматической калибровкой шкал осциллографа.

Процедура записи входного сигнала в файл и считывания данных из файла основана на применении API-функций Windows. При запуске программы операционная система проводит опрос устройств и определяет основные характеристики звуковой карты, в частности частоту дискретизации. Результаты дискретизации сигнала хранятся в массиве данных и автоматически сохраняются в архиве системы диагностики.

Процедура обработки сигнала выполняется по методу оконного преобразования Фурье с «адаптирующимся» окном. Исходными данными для этого блока служат дискретные отсчеты входного сигнала, которые берутся из массива $I_{1\phi}(t)$. Параметры в виде время начала анализа $t_{нач}$, и ширины весового окна и количества окон получаются из архива, при этом ширина окна принимается равной целому числу периодов $I_{1\phi}(t)$ кратному числу пар полюсов. Результатом обработки $I_{1\phi}(t)$ будет массив величин гармоник тока статора, указанных в архиве, в зависимости от номера весового окна в виде $I_v(n)$, пример которых приведен на рисунке 3.7. Данные автоматически заносятся в архив.

Визуализация полученных данных на экране монитора осуществляется по желанию оператора или автоматически в виде спектрограмм и таблицы числовых значений. Далее полученные массивы передаются в блок определение участка стационарности сигнала. Определение зоны диагностирования осуществляется по методу отстройки на определенную величину от среднего значения в виде $\sum I_v(n)/n$. Можно также использовать

контроль постоянства во времени математического ожидания функции. Коэффициент отклонения задается в настройках.

Полученные в результате обработки сигнала величины $I_{vn\pm l/p}$ также заносятся в архив как эталонные параметры для данного типа двигателя. Для сохранения, пользователю предлагается диалоговое окно, в котором он может либо сохранить полученные результаты обработки либо запустить процедуру обработки сигнала заново с новыми параметрами обработки.

Следует добавить, что подобная процедура осуществляется для всех АД производства, которые нуждаются в периодическом диагностировании эксцентриситета ротора.

В режиме «Диагностика» пользователь вводит адрес диагностируемого АД, по которому система диагностики получает доступ к базе данных эталонные параметры для данного типа двигателя. Затем осуществляется процесс регистрация входного сигнала и отображение сигнала $I_{1ф}(t)$, процедура его обработки, определение зоны диагностирования, среднего значения составляющих дополнительного тока и гармоник выполняются также как в режиме «Настройка».

Далее определяется приведенное действующее значение $I_{1фд}$, а по нему и зависимости $I_{1фд} = f(\varepsilon)$, сохраненной в архиве для данного АД в режиме «Настройка» определяется величина эксцентриситета ротора, а также формируются решение о дальнейшей эксплуатации АД.

Блок вывода результатов диагностики кроме сообщения о дальнейшей эксплуатации выдает полученные величины действующего значения дополнительного тока и эксцентриситета ротора АД.

4.4 Практическая реализация системы

Из анализа разделов 1.4 и 4.2 становится ясно, что систему диагностики эксцентриситета ротора на базе ПК конструктивно следует выполнять в виде нормирующего устройства НУ и переносного ПК типа Notebook. Как показано на рисунке 4.9, электрически они соединены экранированным кабелем 1. НУ в свою очередь экранированным кабелем подключается к клеммам амперметра, который является нагрузкой трансформатора тока ТА. При этом информацию о повреждении получают из падения напряжения $U_{ш}$ на сопротивлении амперметра $Z_{A1} = R_{A1} + jX_{A1}$, где R_{A1} и X_{A1} - активное и реактивное сопротивление амперметра. Эта величина определяется как

$$U_{ш} = I_{2ф} Z_{A1}. \quad (4.3)$$

У обмотки амперметра, как правило, активное сопротивление значительно меньше реактивного. Поэтому приближенно

$$U_{ш} \approx I_{2ф} R_{A1}. \quad (4.4)$$

Сопротивление амперметра зависит от его типа и составляет порядка 0,2-0,6 Ом, а измеряемый ток один – пять ампер. В результате максимальное напряжение на входе нормирующего устройства $U_{ш}$ не будет превышать 0,6-1,0 В.

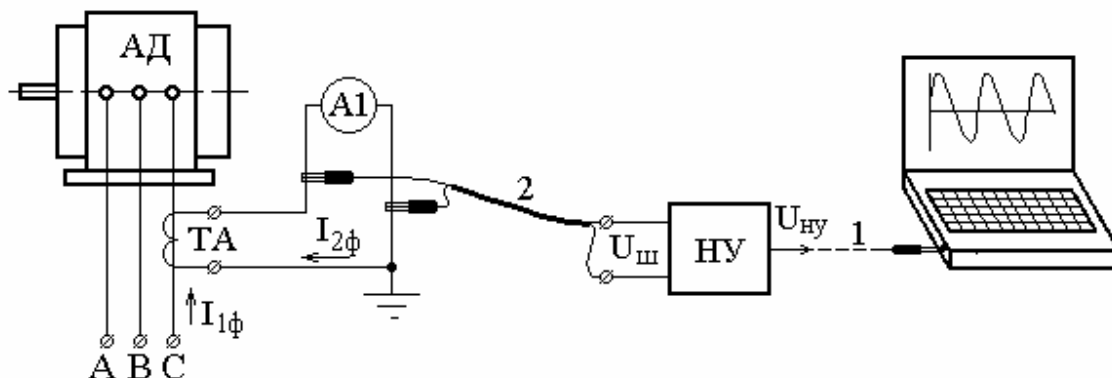


Рисунок 4.9 Схема подключения к амперметру системы диагностирования

Во время диагностики подключение входа нормирующего устройства НУ к клеммам амперметра осуществляется экранированным соединительным кабелем 2 с контактами типа «крокодил». Такое подключение вполне обеспечивает электрическую безопасность персонала от поражения электрическим током и электромагнитную совместимость цепей измерения и цепей диагностики. Выход НУ присоединен экранированным кабелем к разъему «Микрофон» в ПК.

Нормирующее устройство НУ выполняется в виде отдельного блока. Схема одного из вариантов НУ приведена на рисунке 4.10. Емкость С1 выполняет роль фильтра напряжения высоких частот, наводимых внешними магнитными и электрическими полями при диагностике в соединительном кабеле 2. Подключение его в случае необходимости осуществляется выключателем К1.

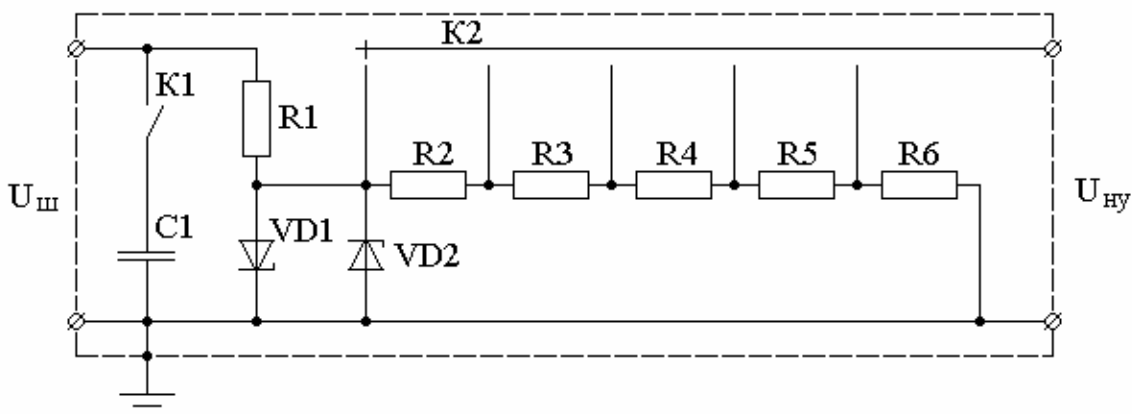


Рисунок 4.10 Схема нормирующего устройства

Оценка эффективности емкости $C1$ производилась по осциллограммам напряжения на выходе щупа. Так осциллограмма этого напряжения без емкости и с ней приведена на рисунке 4.11.

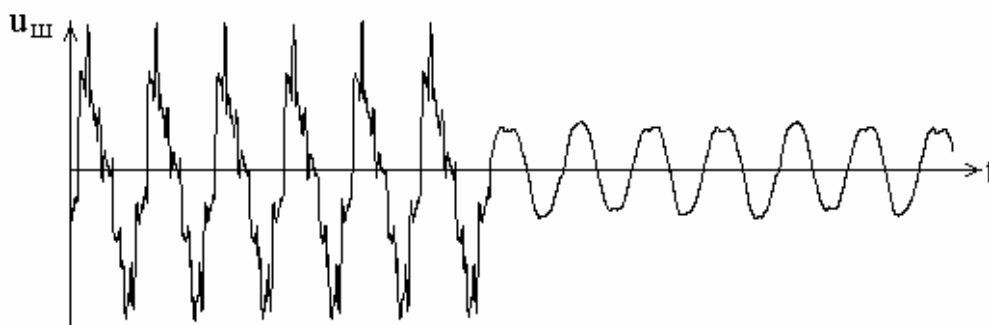


Рисунок 4.11. Осциллограммы напряжения на выходе щупа с емкостью и без нее

Сопротивление $R1$ служит для ограничения тока через ограничитель напряжения из диодов $VD1$ и $VD2$ типа КД 209. В результате напряжение на диодах не превышает величины 0,82-0,85В независимо от типа используемого амперметра. Что гарантирует защиту ЗК от перенапряжения. Одновременно сопротивления $R1-R6$ представляют собой ступенчатый делитель напряжения, в котором величина напряжения $U_{ну}$ регулируется переключателем $K2$. Это делается для четкой фиксации напряжений при диагностике различных АД с различными типами амперметров.

Соединительные кабели выполняются экранированными, при этом их экран всегда заземляется. Первый кабель имеет разъем для подключения к гнезду «Микрофон» в ПК, а второй - зажимы типа «крокодил» для подключения к клеммам амперметра.

Все ПК имеют возможность программного отключения или включения звукового входа, а также изменения уровня входного сигнала. Таким образом, используемый для диагностики ПК нуждается в соответствующей настройке. Настройка программного аттенюатора ПК осуществляется следующим образом:

1. В правом нижнем углу, щелкнув правой кнопкой мыши по значку «Громкость», следует выбрать в открывшемся контекстном меню пункт «Открыть регулятор громкости». Если значок «Громкость» отсутствует, то следует последовательно нажать «Пуск» - «Настройка» - «Панель управления», в открывшемся окне выбрать «Звук и аудиоустройства» или, при наличии программы, щелкнуть по значку программы для управления ЗК (например, «Диспетчер Realtek HD»). В окне «Звук и аудиоустройства» выбрать вкладку «Речь», в области «Запись речи» нажать на кнопку «Громкость».

2. В появившемся окне «Master Volume» («Регулятор громкости») в строке меню нужно выбрать «Параметры». Появится окно «Свойства».

3. В окне «Свойства» в выпадающем списке «Микшер» следует выбрать устройство ввода (как правило, в названии устройства ввода обычно фигурирует слово «input»). После в поле «Отображать регуляторы громкости» необходимо активировать Line In (Линейный вход) и Microphone (Микрофонный вход) и нажать ОК;

4. В появившемся окне «Recording Control» («Управление записью») можно включить/отключить аудиовходы и изменить уровень входного сигнала. Помимо этого, имеется возможность активировать дополнительное усиление у микрофонного входа. Для его активации следует нажать на кнопку «Настройка». В появившемся окне «Дополнительные параметры: Microphone» нужно поставить галочку в параметре «1 Microphone Boost» и нажать кнопку «Заккрыть».

Для регулирования уровня входного сигнала в системе Windows 7, получившей большую популярность на современных ноутбуках и стационарных ПК:

1. Необходимо, щелкнув правой кнопкой мыши по иконке «Динамики» в панели задач, в открывшемся контекстном меню выбрать пункт «Записывающие устройства».

2. В появившемся диалоговом окне «Звук» откроется вкладка «Запись». Далее следует выбрать микрофонное устройство в поле выбора устройства и нажать кнопку «Свойства».

3. В появившемся окне «Свойства: Микрофон» следует выбрать вкладку «Уровни». Здесь можно регулировать уровень записываемого сигнала в пределах от 0 до 100 единиц громкости в поле «Микрофон». Также есть возможность изменять усиление входного сигнала в поле «Усиление микрофона» от 0 дБ (единичный коэффициент усиления) до 48 дБ (коэффициент усиления 251,2). Всегда следует устанавливать 100 единиц громкости. После настройки следует в окне «Свойства: Микрофон» и далее в окне «Звук» нажать кнопку ОК для применения настроек.

Такая настройка ПК обеспечивает одинаковые условия его эксплуатации и повторяемость при диагностике АД в различное время.

Минимальным требованием к программному обеспечению ПК является наличие операционной системы Windows. В системное программное обеспечение входит интегрированная объектно-ориентированная среда программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise.

Операционная система производит диалог с пользователем, осуществляет управление компьютером, его ресурсами (оперативной памятью, местом на дисках и т.д.), запускает прикладные программы на выполнение. Так как это управляющий программный комплекс, то он в свою очередь накладывает требования к аппаратным средствам.

Для реализации устройства требуется следующая аппаратная платформа:

- Pentium-совместимый процессор с частотой 133 МГц или выше;
- 64 Мб оперативной памяти;
- жесткий диск должен иметь объем примерно 2Гб, на котором не менее 650 Мб свободного места;

- звуковая карта с частотой дискретизации 48кГц;
- дисковод для компакт дисков CD-RW;
- монитор VGA;
- мышь Microsoft Mouse или другое совместимое указывающее устройство.

Описанная система диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя была апробирована на разнотипных двигателях Аксуского завода ферросплавов, о чем свидетельствует заключение (Приложение А).

4.5 Выводы

1. Сигнал на входе звуковой карты не должен превышать 0,825 В. Реально этот показатель несколько больше.
2. Встроенная звуковая карта должна обладать гладкой АЧХ в области низких частот и низким уровнем шума. Поэтому предпочтительней для нужд диагностики использование чипов типа Conexant Cx20585 (Realtek и Advance Logic).
3. Программное обеспечение предложенной системы диагностики, реализованное в интегрированной объектно-ориентированной среде программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise позволяет использовать его практически на любом ПК.
4. Опытный образец системы диагностики эксцентриситета ротора показал, что такая ее реализация способна достаточно эффективно выявлять статический эксцентриситет ротора в процессе эксплуатации АД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача функциональной диагностики повреждений асинхронных двигателей в целях повышения их эксплуатационной надежности и экономичности. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. Выявлено, что эффективной и наиболее доступной информацией об эксцентриситете ротора является ток статора АД, а в качестве диагностического признака повреждения следует использовать составляющие $I_{v\pm 1/p}$ его дополнительного тока с частотами $f_c(I_{v\pm 1/p})$.

2. Обнаружено, что величина составляющих дополнительного тока статора в значительной мере зависит не только от эксцентриситета ротора, но и от внешних воздействий в виде колебаний частоты и величины напряжения питающей АД сети, вибраций АД и приводного механизма, а также от неравномерности нагрузки. Поэтому увеличение эксцентриситета ротора АД не всегда сопровождается ростом составляющих дополнительного тока, а система диагностики должна успешно диагностировать повреждение при неявно выраженных признаках этого повреждения.

3. Предложены способы распознавания наличия и величины эксцентриситета на основе использования искусственной нейронной сети и по действующему значению дополнительного тока.

4. Разработан метод оконного преобразования с адаптирующимся окном, применение которого при обработке сигнала в системах диагностики эксцентриситета ротора АД позволяет учитывать колебания частоты питающей сети.

5. Рассмотрена возможность использования метода оконного преобразования с адаптирующимся окном для выявления бросков напряжения и зоны диагностирования.

6. Разработан метод коррекции составляющих дополнительного тока, позволяющий системе диагностики успешно реагировать на колебание величины и спектрального состава напряжения питающей сети.

7. Предложено для отстройки от внешних воздействий на АД диагностику проводить в режиме холостого хода с использованием методов коррекции и оконного преобразования с адаптирующимся окном.

8. Разработана технологическая схема простой системы диагностики эксцентриситета ротора, в которой диагностика осуществляется в режимах «Настройка» и «Диагностика», при этом в качестве АЦП используется звуковая карта.

9. Разработано программное обеспечение «Елена-2014», позволяющее обеспечить экспериментальную поддержку теоретических исследований по совершенствованию систем диагностики эксцентриситета ротора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Вольдек А.И. Электрические машины. -Л.: Энергия, 1974.- 639с.
- 2 Бойко Е.П., Гаинцев Ю.И., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения. -М.: Энергия, 1980.- 488с.
- 3 Петров Г.Н. Электрические машины. Ч.2. Асинхронные машины и синхронные машины. -М.-Л.: Энергия, 1968.- 224с.
- 4 Корогодский В.И., Кужеков С.П., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1000 В. -М.: Энергоатомиздат, 1987.- 248с.
- 5 Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. -М.: Энергия, 1980.- 909с.
- 6 Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. -Л.: Энергия, 1976.- 247с.
- 7 Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. -Л.: Энергия, 1975.- 296с.
- 8 Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. -М.: Энергия, 1981.- 351с.
- 9 Иванов Е.А. Электрические машины переменного тока. Асинхронные двигатели. Руководство к курсовому проектированию. СЭПИ.- 1959.- 121с
- 10 Новожилов А.Н. Токи асинхронного двигателя при статическом эксцентриситете// Электротехника. – 1994.- №11.- С.45÷47
- 11 Новожилов А.Н., Исупова Н.А. Потери электроэнергии от технологического эксцентриситета асинхронных двигателей// Вестник ПГУ, серия Энергетическая. – 2010.- №3.- С.64-68
- 12 Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. -М.: Энергоатомиздат, 1990.- 320с.
- 13 Рогачев В.А. Автореферат дисс. «Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных двигателей по гармоническому составу токов статора». Новочеркасск 2008г.
- 14 Йондем М.Е., Никиян Н.Г., Акопян Г.С. Магнитная проводимость воздушного зазора асинхронной машины при эксцентриситете ротора// Изв. вузов. Электромеханика. – 1985.- №5.- С.33÷35
- 15 Никиян Н.Г., Падеев А.С. Магнитное поле и сила одностороннего притяжения при нарушении равномерности воздушного зазора асинхронной машины// Электротехника. – 2001.- №8.- С.46÷50
- 16 Костенко М.П., Пиотровский Л.И. Электрические машины. ч. II. – М.;Л.: Госэнергоиздат, 1957.
- 17 Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987.
- 18 Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. -М.: Высшая школа, 1967.- 775с.
- 19 Клецель М.Я., Мануковский А.В., Новожилов А.Н. Защита асинхронного двигателя от эксцентриситета ротора //Электричество. – 2006.- №7.- С 63-67.

20 Гашимов М.А., Мирзоева С.М. Исследование в целях диагностики электромагнитных процессов в электрических машинах при неравномерности воздушного зазора // Электричество. – 2002. – №11. – С.52-45.

21 Гашимов М.А., Мирзоева С.М., Рамазанов Н.К. Диагностика эксцентриситета электрических машин в условиях эксплуатации // Электричество. – 2005. – №6. – С.41-45.

22 Григорьев В.И. Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения: Справ.пособие. М.: Колос, 2006. 272с.

23 Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. №31.

24 W. T. Thomson: A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – Past Present and Future. Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, Sept. 1999, pp 3-18

25 Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева С.М. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротора в асинхронных двигателях без их отключения // Электротехника. 1998. №10. С. 46-51.

26 Subhasis N., Hamid A. Toliyat. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review // Electric Machines & Power Electronics Laboratory, Texas University, 1999г.

27 Rodriguez I, Alves R. Detection of the Combination of Static and Dynamic Air gap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors using Stator Current Monitoring // XVII International Conference on Electrical Machines ICEM 2006.

28 Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка напряжения и тока // Новости электротехники. 2008. №49. С. 50-52.

29 A. Stavrou. Impedance vector monitoring strategy for on-line detection of eccentricity in induction motors // XVII International Conference on Electrical Machines ICEM 2006

30 Новожилов А.Н., Воликова М.П., Андреева О.А., Новожилов Т.А. Особенности конструкции индукционных преобразователей для релейной защиты и диагностики электрических машин переменного тока // Электричество. – 2009. – №4. – С19÷24.

31 Никиян Н.Г., Сурков Д.В. Освоение и оценка методов электромагнитной диагностики эксцентриситета ротора асинхронных двигателей // Вестник ОГУ. 2005. №2. С.163-166.

32 Афанасьев В.В, Адоньев Н.М., Кибель В.М., Сирота И.М., Стогний Б.С. Трансформаторы тока. -Л.: Энергоатомиздат, 1989.- 416с.

33 Дьяконов А.Ф., Ишкин В.Х., Мамиконянц Л.Г. Электроэнергетика мира – состояние, проблемы (по материалам 38 – й сессии СИГРЭ, Париж). – Энергетика за рубежом, 2001, вып.5-6.

34 Казанский В.Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите. -М.: Энергоатомиздат, 1988.- 240с.

35 United States Patent 3.970.897. Detector and apparatus incorporating the same for detecting phase-asymmetry and protecting there-phase motors against dangerous operating condituons. D.Tamir, M.S.Erlicki.- 1974.- Apr.22.

36 Вавв М. Fault detection system monitors the health of AC induction motors. Control engineering.- nr 4.- 1988.- s.86÷87.

37 А.С. №1046852. СССР. Электрическая трехфазная машина с встроенным блоком для защиты от повреждений обмотки статора // Клецель М.Я., Новожилов А.Н., Поляков В.С. Оpubл. 07.10.83.

38 А.С. №1046826. СССР. Электрическая трехфазная машина // Клецель М.Я., Новожилов А.Н., Поляков В.С., Солодухин И.Н., Чепелюк Я.З., Байда Д.Ф. Оpubл. 07.10.83.

39 United States Patent 4.453.190. Method of short circuit protection of electrical three-phase machine and device there- for. M.Y.Kletzel, V.E.Polyakov, A.N.Novozhilov, I.N.Solodukhin, Y.Z.Chepeljuk, D.E.Baida.- 1984.- Jun.5.

40 Brevet d'inventicn Republidue, Francaise 2.505.570. Procede de protectiond'une machine electrique a icurant triphase contre les courts-circuits et dispositifs ponr la mise enleuvre. M.Y.Klezel, V.E.Polyakov, A.N.Noozhilov, I.N.Solodukhin, Y.Z.Chepeljuk et D.E.Baida. -1986. -№29.

41 А.С. №1046853 СССР. Электрическая машина // Клецель М.Я., Новожилов А.Н. Оpubл. 07.10.83.

42 А.С. №756536. СССР. Устройство для защиты генератора переменного тока // Утляков Г.Н., Куляпин В.М. и др. Оpubл. 15.08.80.

43 А.С. №1182605. СССР. Асинхронный двигатель с блоком защиты // Загородский В.Д., Чучман Ю.И., Волошанский Е.В. Оpubл. 30.09.85.

44 А.С. №1129701. СССР. Асинхронный двигатель с блоком защиты // Завгородский В.Д., Павлович Н.В., Неверкла С.В. Оpubл. 15.12.84.

45 А.С. №1249655 СССР. Асинхронный двигатель с блоком защиты // Завгородский В.Д., Павлович Н.В. и Нестерух М.П. Оpubл. 07.08.86.

46 А.С. №1492421. СССР. Электрическая машина с датчиком внутренних повреждений обмотки статора // Церазов А.Л., Соколов В.Л., Трегубов Н.С. Оpubл. 07.07.89.

47 А.С. №1387108. СССР. Электрическая машина с блоком контроля внутренних повреждений обмотки // Церазов А.Л., Соколов В.Л. Оpubл. 07.04.88.

48 А.С. №917136. СССР. Устройство для обнаружения повреждений стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя // Рассказчиков А.В., Савельев В.А. и др. Оpubл. 30.03.82.

49 А.С. №1205234. СССР. Электрическая машина с устройством контроля витковых замыканий в обмотке ротора // Фащук В.И., Благой В.М., Коробков В.А. Оpubл. 15.01.86.

50 А.С. №888288 СССР. Устройство для контроля эксцентриситета ротора относительно статора//Власенко А.М., Пархоменко А.Г. Оpubл. 07.12.81.

51 А.С. №800616 СССР. Устройство для измерения воздушного зазора// Бабаджанян П.А., Калугин Б.Н., и др. Оpubл. 30.01.81.

52 А.С. №1010452. СССР. Устройство для контроля воздушного зазора// Бабаджанян П.А., Калугин Б.Н., и др. Оpubл. 07.04.83.

53 А.С. №1043574 СССР. Способ косвенного контроля неравномерности воздушного зазора асинхронного двигателя// Рогозин Г.Г., Пятлина Н.Г. и др. Оpubл. 23.09.83.

54 United States Patent 3.970.897. Detector and apparatus incorporating the same for detecting phase-asymmetry and protecting there-phase motors against dangerous operating condituons. D.Tamir, M.S.Erlicki.- 1974.- Apr.22.

55 А.С. №1191849 СССР. Устройство для косвенного контроля неравномерности воздушного зазора электрических вращающихся машин//Новиков Ю.Д., Бабин Ю.В. Оpubл. 15.11.85.

56 Инновационный патент РК. №13724, МПК G01R 31/34. Устройство диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя [Текст] /Новожилов А.Н., Кислов А.П., Хацевский В.Ф., Андреева О.А., Новожилов Т.А., Сагайдак Т.В. Заявитель и патентообладатель Павлодарский государственный университет им. С. Торагырова (KZ). — № 2002/0626.6; заявл. 12.05.2002; опубл. 14.11.2003, Бюл. № 11. — 3 с. : ил

57 Инновационный патент РК. №19628, МПК G01R 31/34, H01H 71/00. Способ диагностики эксцентриситета короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя [Текст] /Новожилов А.Н., Пфлюг Л.О., Новожилов Т.А. Заявитель и патентообладатель Павлодарский государственный университет им. С. Торагырова (KZ). — № 2006/1330.1; заявл. 29.11.2006 ; опубл. 16.06.2008, Бюл. № 6. — 3 с. : ил

58 Никиян Н.Г. Способ измерения эксцентриситета ротора в многоскоростных асинхронных машинах// Электротехника. — 1989.- №6.- С.52÷54

59 А.Н. Новожилов, Е.В. Крюкова, Т.А. Новожилов Диагностирование повреждений ротора асинхронных двигателей // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. — 2014. - №1, с. 101-116.

60 А.Н. Новожилов, Е.В. Крюкова, Т.А. Новожилов, Н.А.Исупова Методы обработки сигнала для выявления повреждений ротора асинхронного двигателя // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. — 2014. - №1, с.95-101.

61 Panaderio R.P., Llinares J.P. Review diagnosis methods of Induction Electrical Machines based on Steady State Current, XIII Spanish-Portuguese conference on electrical engineering (XIII CHLIE), Spain, 3-5 July 2013.

62 Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2006. — 751 с.: ил.

63 H.H.S.H.Kia, G.A.Capolino, “A high-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection”, IEEE Trans/Ind/Electron.,vol.54, pp.2305-2314, Aug.2007.

64 B. Ayhan, H. J. Trussell, M-Y. Chow, M-H. Song, On the Use of a Lower Sampling Rate for Broken Rotor Bar Detection With DTFT and AR—Based Spectrum Methods, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 55(3), (2008) 1421-1434.

65 Технологии обслуживания оборудования "по состоянию"
[Электронный ресурс] URL: [http://www.vitec.ru
>upload/iblock/3ef/kepstralni_analiz.pdf](http://www.vitec.ru/upload/iblock/3ef/kepstralni_analiz.pdf)

66 Кравченко В.М. Техническое диагностирование механического оборудования: Учебник. – Ч.2 – Практика технического диагностирования. / В.М. Кравченко, В.А.Сидоров. – Донецк, 2006.

67 Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344с.

68. 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. - С.389-396.

69. В.В.Кухарчук, С.Ш. Кацыв «Применение вейвлет-преобразований в задачах мониторинга, вибродиагностирования машин и оборудования»/ Автоматика и информационно-измерительная техника, 2009, №4, с.1-7.

70 A.A. Da Silva et al., "Rotating machinery monitoring and diagnosis using short-time Fourier transform and wavelet techniques", in Proc. 1997 Int.Conf.Maintenance and Reliability, vol.1, Knoxville, TN, pp.14.01-14.15.

71 E. Al Ahmar, V.Choqueuse, M.E.H.Benbouzid, Y.Amirat, J.El Assad, R.Karam, and S.Farah "Advanced signal processing techniques for fault detection and diagnosis in a wind turbine induction generator drive train: a comparative study", IEEE Transaction of industry applications, vol.47, No.1,Jan/Febr, 2011.

72 W. J. Wang, P. D. McFadden, Early detection of gear failure by vibration analysis I. Calculation of the time-frequency distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, 7 (1993) 193-203.

73 F. A. Andrade, I. Esat, M. N. M. Badi, Gearbox fault detection using statistical methods, time-frequency methods (STFT and Wigner-Ville distribution) and harmonic wavelet – A comparative study, in: Proceedings of COMADEM '99, Chipping Norton, 1999, pp. 77-85.

74 L. Cohen, Time-frequency distribution – a review, Proceedings of the IEEE, 77 (1989) 941-981.

75 M. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.47, no.5, pp.983-993, 2000.

76 D. Ho, R. B. Randall, Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals, Mechanical Systems and Signal Processing, 14 (2000) 763-788.

77 R. B. Randall, J. Antoni, S. Chobsaard, The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals, Mechanical Systems and Signal Processing, 15 (2001) 945-962.

78 A survey of signal processing and decision technologies for CBM [Электронный ресурс]. <http://www.livingreliability.com/en/posts/a-survey-of-signal-processing-and-decision-technologies-for-cbm/>

- 79 Цифровая обработка сигналов. Преобразование Гильберта-Хуанга [Электронный ресурс] <http://gendocs.ru/v37409/> лекция_ _преобразование_гильберта-хуанга
- 80 M.E.H.Benbouzid et al., "Induction motors fault detection and localization using stator current advanced signal processing techniques", IEEE Trans.Power Electron., vol.14, pp.14-22, Jan. 1999.
- 81 Wang, W. J. Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection // Journal of Sound and Vibration. – 1996. No.192. – pp. 927-939.
- 82 Rubini, R. Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2001. – No.15. – pp. 287-302.
- 83 Luo, G. Y. On-line vibration analysis with fast continuous wavelet algorithm for condition monitoring of bearing // Journal of Vibration and Control. – 2003. – No.9. – pp. 931-947.
- 84 Dalpiaz, G. Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: comparison of vibration analysis techniques // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1997. – No.11. – pp. 53-73.
- 85 J. Cusido, L.Romeral, J.A.Ortega, J.A.Rosero, A.G.Espinosa, Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition, IEEE Transaction on Industrial Electronics 55(2) (2008) 633-643.
- 86 Z.Ye, B.Wu, A.Sadeghian, Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 50(6), 2003, 1217-1228.
- 87 Xu, Y.-G. Research on Haar spectrum in fault diagnosis of rotating machinery // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). – 1991. No.12. – pp. 61-66.
- 88 Tonshoff, H.K. Application of fast Haar transform and concurrent learning to tool-breakage detection in milling // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2003. – No.8. – pp. 414-417.
- 89 Глазырина, Т.А. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин // Электричество. – 2012. №6. – С.42-45.
- 90 A.Bellini, G.Franceschini, C.Tassoni, Monitoring of induction machines by maximum covariance method for frequency tracking, IEEE Transaction on Industry Applications 42(1) (2006) 69-78.
- 91 Марпл – мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения/ Пер.с англ. – М.: Мир, 1990.
- 92 Новожилов А.Н., Полищук В.И., Исупова Н.А. Обзор способов диагностики эксцентриситета ротора машин переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011.- № 6.- С.26-29.
- 93 Новожилов А.Н., Кислов А.П., Андреева О.А., Пфлюг Л.О., Крюкова Е.В., Новожилов Т.А., Полищук В.И., Воликова М.П. Особенности использования рядов Фурье при построении системы диагностики электрических машин//Вестник ПГУ. – 2005.- № 1.- С.109÷110.

94 Новожилов А.Н., Антонцев А.В., Мануковский А.В., Исупова Н.А., Крюкова Е.В. Особенности построения системы диагностики электрических машин на базе персонального компьютера со встроенной звуковой картой // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012.- № 5.- С.36-40.

95 Новожилов А.Н., Крюкова Е.В., Новожилов Т.А. Двухлучевой осциллограф на базе персонального компьютера // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – 2013. - №2. –С.228-234.

96 Национальный стандарт РФ. ГОСТ Р 54149 — 2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в система электроснабжения общего назначения. Введен в действие с 01.01.2013.

97 Электротехнический справочник: В 3т. Т3. 2 кн. Кн1. Производство и распределение электрической энергии (Под общей редакцией гл. ред. Орлова Н.Н. и др) 7-е изд., испр. И доп. –М.: Энергоатомиздат, 1988г.-880с.

98 Вайнреб К. Диагностика неисправности ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // Электричество. – 2012.- №7.- С.51-57.

99 Новожилов А.Н., Крюкова Е.В., Исупова Н.А., Новожилов Т.А., Никитин К.И. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронного двигателя по среднеквадратичной величине дополнительных гармонических токов статора //Т 38 Технические науки – от теории к практике. №10(23). Часть 1: сборник статей по материалам XXVII Международной научно-практической конференции. Новосибирск: Изд. «СибАК», 2013. 146с.

100 Rummelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning internal representations by error propagation // Vol. 1 of Computational models of cognition and perception. – Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

101 Ng A. Machine Learning. – Stanford Video Lectures. – 2012. – URL: <https://class.coursera.org/ml-2012-002/class/index>.

102 Ричард Блейхунд. Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции. [Электронный ресурс]. <http://www.dsplib.ru/content/win/win.h>

103 A.Novozhilov, Ye.Kryukova, T.Novozhilov Short-time Fourier transformation with an adaptive window for the diagnosis of an asynchronous motor rotor eccentricity // Proceedings of the 2nd European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2014.

104 Новожилов А.Н., Антонцев А.В., Мануковский А.В., Исупова Н.А., Крюкова Е.В. Особенности построения системы диагностики электрических машин на базе персонального компьютера с встроенной звуковой картой // ICEEE-2012 14th International conference «Electromechanics, electrotechnology, electromaterials and components»: abstracts- September 23-29, 2012, Alushta, Crimea, p 123-124

105 Вибродиагностика и цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс]. □ Осциллограф из ПК: Адаптер для звуковой карты. http://signal.narod.ru/new_page_25.

- 106 3DNews Daily Digital Digest [Электронный ресурс]. □ Территория звука. http://3dnews.ru/multimedia/territory_sound_3/index02
- 107 Курбатов А. Второе амплуа звуковой платы // Компьютерра. □ 1999. □ №18-19. <http://offline.computerra.ru/1999/296/3677/>
- 108 Delphi Language Guide [Electronic resource]. □ Borland Delphi Enterprise Environment Version 7.0 (Build 4.453) // Delphi Language Reference / Data Types, Variables, and Constants / Structured Types / Arrays / Static Arrays.
- 109 Юров И. Звук под микроскопом // Чип. □ 2003. □ №2
- 110 Звуковые карты [Электронный ресурс]. □ Структура карты, основные выполняемые функции. http://uvsr.stu.ru/foto/Ucheba/zwuk_kart
- 111 Проект и .com [Электронный ресурс] / Лядов Г., Лядов М. // Практическое тестирование Intel High Definition Audio на примере кодека ALC880. <http://ixbt.com/multimedia/intel-hdaudio>
- 112 Delphisources [Электронный ресурс]. <http://delphisources.ru/forum/showthread.php?t=17302>
- 113 A. Novozhilov, Ye. Kryukova, A. Kislov, O. Andreyeva, T. Novozhilov Using artificial neural network for the diagnosis of an asynchronous motor rotor eccentricity // Life Science Journal, No. 11(8s) – 2014, pp. 116-119.
- 114 Новожилов А.Н., Антонцев А.В., Крюкова Е.В., Исупова Н.А., Новожилов Т.А. Диагностика эксцентриситета ротора электрической машины переменного тока с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – 2013. - №1. –С.68-76.
- 115 Новожилов А. Н., Антонцев А.В., Крюкова Е.В., Исупова Н.А., Новожилов Т.А., Никитин К.И. Диагностика эксцентриситета ротора электрической машины переменного тока с использованием искусственных нейронных сетей // V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!», 12-14 ноября 2013г., Россия, г.Омск.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Аксуский завод ферросплавов - филиал АО ТНК "Казхром"

Заключение о производственных испытаниях системы диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя (по и полож. решению по заявке 2013/1853.1)

Устройство диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя предназначено для выявления смещения ротора в процессе эксплуатации. Конструктивно эта система выполнена в виде соединительного кабеля подключаемого к трансформатору тока диагностируемого двигателя и персональному компьютеру типа «Ноутбук». Работа системы диагностики основана на измерении тока статора, выделении из него гармонических составляющих, которые появляются при эксцентриситете ротора и определении действующего значения дополнительного тока из этих составляющих.

Производственные испытания системы проводились на разнотипных асинхронных двигателях, в которых имелаась возможность перемещения опор подшипников завода. Они показали способность системы достаточно надежно выявлять наличие эксцентриситета ротора в процессе эксплуатации. Наличие эксцентриситета ротора затем подтверждено традиционными методами после частичной разборки этих двигателей.

Зам. начальника УЭО по
электротехнической части

Начальник ЭТЛ

Ю.В.Кисилев

П.П. Варкентин

