

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»



*На правах рукописи*

НОВОСЕЛОВ ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО ВНЕШНЕМУ  
МАГНИТНОМУ ПОЛЮ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Назарычев А.Н.

Иваново 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Список сокращений и условных обозначений</b> .....	5
<b>Введение</b> .....	6
<b>Глава 1. Повреждаемость и методы функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных двигателей</b> .....	14
1.1 Повреждаемость короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей	14
1.2. Методы функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей.....	20
1.2.1. Методы, основанные на анализе электромагнитного поля внутри двигателя	21
1.2.2 Методы, основанные на анализе тока статора.....	24
1.2.3. Методы, основанные на анализе внешнего магнитного поля.....	31
1.2.4. Методы, основанные на анализе вибрации.....	33
1.2.5. Методы, основанные на измерении скольжения.....	35
1.3. Выбор и обоснование задач дальнейших исследований.....	36
Выводы по главе 1.....	39
<b>Глава 2. Математическое моделирование внешнего магнитного поля асинхронного двигателя</b> .....	40
2.1. Постановка задачи.....	40
2.2. Компьютерное моделирование внешнего магнитного поля асинхронного двигателя.....	41
2.3. Анализ результатов компьютерного моделирования .....	46
2.4. Исследование влияния эксплуатационных факторов на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя.....	60
2.4.1. Исследование влияния несимметрии напряжения на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя.....	60
2.4.2. Исследование влияния нагрузки на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя.....	68
2.4.3. Исследование влияния эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя.....	73

2.5. Исследование изменений внешнего магнитного поля при удалении точки измерения от корпуса электродвигателя.....	85
Выводы по главе 2.....	90
<b>Глава 3. Разработка анализатора спектра.....</b>	<b>92</b>
3.1. Постановка задачи.....	92
3.2. Разработка способа определения скольжения асинхронного электродвигателя по внешнему магнитному полю .....	93
3.3. Разработка метода автокоррекции времени записи сигнала.....	98
3.4. Определение методической погрешности определения частоты с помощью автокоррекции времени записи сигнала.....	109
3.5. Определение критериев достоверности определения скольжения по гармоникам эксцентриситета ротора.....	112
3.6. Анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала.....	116
Выводы по главе 3.....	126
<b>Глава 4. Разработка метода функционального диагностирования обмотки ротора асинхронных электродвигателей по внешнему магнитному полю.....</b>	<b>128</b>
4.1. Постановка задачи.....	128
4.2. Методика проведения экспериментальных исследований.....	129
4.3. Исследование внешнего магнитного поля при пуске электродвигателя.....	134
4.4. Доказательство существования гармоник эксцентриситета ротора во внешнем магнитном поле асинхронного электродвигателя.....	136
4.5. Анализ практической эффективности применения алгоритма автоматической коррекции времени записи сигнала.....	143
4.6. Проверка критерия определения качества регистрируемого сигнала.....	147
4.7. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя с поврежденной обмоткой ротора.....	151
4.8. Разработка методики функциональной диагностики обмотки ротора асинхронного электродвигателя по внешнему магнитному полю.....	168
4.9. Оценка помехозащищенности внешнего магнитного поля как диагностического сигнала.....	174

<b>Выводы по главе 4</b> .....	182
<b>Заключение</b> .....	184
<b>Список литературы</b> .....	186
<b>Приложение 1. Данные для моделирования электродвигателей</b> .....	198
<b>Приложение 2. Рабочие параметры тестовых асинхронных двигателей</b> .....	213
<b>Приложение 3. Проверка корректности моделирования магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя</b> .....	216
<b>Приложение 4</b> .....	225

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

MCSA – Motor Current Signature Analysis (Метод спектрального анализа тока статора);

АД – асинхронный электродвигатель;

АВЗС – автокоррекция времени записи сигнала;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ВИД –внутренний индуктивный датчик;

ВМП – внешнее магнитное поле (под ВМП в работе понимается радиальная составляющая индукции внешнего магнитного поля);

ГЭР – гармоники эксцентриситета ротора;

ДС – дымосос;

ДХ – датчик Холла;

ЗГР – зубцовые (пазовые) гармоники ротора;

ИОР – исправная обмотка ротора;

ОР – обмотка ротора;

ОПФ – оконное преобразование Фурье;

ПОР – поврежденная обмотка ротора (подразумевается обмотка ротора с одним оборванным стержнем);

СЭСН – система электроснабжения собственных нужд;

ФОР – фиктивная обмотка ротора;

Гармоника  $\text{FOR}_{\nu\pm}$  – подразумевается гармоника фиктивной обмотки ротора  $\nu$ -ого порядка на верхней (нижней) боковой частоте;

ФН – фосфатный насос.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Работа электростанций зависит от надежности системы электроснабжения собственных нужд (СЭСН). Наиболее распространенной причиной отказов СЭСН являются неисправности асинхронных электродвигателей (АД), связанные с тяжелыми условиями и режимами их эксплуатации. Отказы АД СЭСН электростанции могут привести к отключению энергоблока и развитию аварийной ситуации в энергосистеме.

Одним из наиболее повреждаемых узлов АД СЭСН, работающих с тяжелыми условиями пуска (дробилки, дымососы, дутьевые вентиляторы, мельницы и т.д.) является короткозамкнутая обмотка ротора (ОР), причем свыше 80 % повреждений приходится на обрывы стержней. Со временем оборванный стержень может отогнуться (как правило, при пуске) и повредить обмотку статора. Обрывы стержней ОР приводят к снижению пускового момента и увеличению длительности пуска, повышению вибрации и, соответственно, к ускоренному износу других узлов АД, а также к увеличению стоимости восстановительного ремонта. В случае своевременного выявления повреждения короткозамкнутой ОР ремонт может быть проведен силами предприятия, не требуя при этом больших затрат. Таким образом раннее выявление обрывов стержней ОР АД является актуальной задачей, которая может быть решена с помощью методов функциональной диагностики.

Согласно ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009, ГОСТ ISO 20958-2015 и ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015 для функционального контроля состояния ОР АД рекомендуются методы, основанные на спектральном анализе вибрации, тока статора (MCSA), магнитного поля воздушного зазора или аксиальной составляющей магнитного потока внешнего магнитного поля (ВМП) АД.

В настоящее время основным методом функциональной диагностики АД на электрических станциях является вибродиагностика, но как показывает практика, этот метод отличается низкой чувствительностью к обрыву одного стержня. Методы, основанные на анализе тока статора и магнитного поля воздушного зазора хорошо известны и изучены. Они имеют ряд недостатков, которые препятствуют

их внедрению на электростанциях. Методы, основанные на анализе тока статора требуют доступа к цепям питания, а методы, основанные на анализе магнитного поля воздушного зазора, требуют установки внутри АД датчика, который сам может стать причиной повреждения. Методы диагностики, основанные на анализе аксиального магнитного потока ВМП не так хорошо изучены, как предыдущие и не получили заметного распространения. В этих методах магнитный поток измеряется с помощью датчика магнитного потока, представляющего собой кольцевую катушку без сердечника, которая устанавливается с торца двигателя. Способ измерения и обуславливает основные недостатки метода: с торца на многих АД устанавливается вентилятор, что приводит к ослаблению, а в некоторых случаях и к отсутствию регистрируемого сигнала; под каждый габарит АД требуется свой датчик.

Исследованиями радиальной составляющей ВМП, направленным на разработку методов диагностирования узлов АД, в частности ОР, пока уделяется мало внимания, поэтому исследования в данном направлении представляют научный и практический интерес. Успешная разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей по радиальной составляющей внешнего магнитного поля будет способствовать повышению надежности эксплуатации асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций благодаря уменьшению числа внезапных отказов за счет увеличения контролепригодности асинхронных электродвигателей как объекта диагностирования и своевременного выявления обрывов стержней обмотки ротора.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в исследование надежности эксплуатации и вопросы функционального контроля состояния АД внесли многие российские и зарубежные ученые, в том числе: Котеленец Н.Ф., Савельев В.А., Назарычев А.Н., Барков А.В., Рассказчиков А.В., Скоробогатов А.А., Иноземцев Е.К., O'Donnell, P., Tavner P., Penman J., Benbouzid M.E.H., Thomson W.T., Kliman G. B., Elkasabgy N.M. и др.

Активное развитие методов функциональной диагностики узлов АД, в частности ОР, намечилось в начале 80-х годов прошлого века. Савельевым В.А. и Рассказчиковым А.В. одними из первых был предложен способ выявления обрывов

стержней ОР по магнитному полю воздушного зазора. Позднее Kliman G. B. предложил усовершенствованный вариант вышеуказанного метода, отличающаяся обработкой и анализом диагностического сигнала. В магнитном поле воздушного зазора были выявлены гармонические составляющие, отражающие состояние ОР АД. Было сделано предположение (Tavner P., Penman J., Kliman G. B.) что эти гармонические составляющие будут присутствовать также в токе статора и в аксиальной составляющей магнитного потока ВМП. Это послужило толчком к развитию очень мощного направления технической диагностики электрических вращающихся машин – Motor Current Signature Analysis (Метод спектрального анализа тока статора). Вклад в развитие данного направления внесли Tavner P., Penman J., Thomson W.T., Kliman G. B., Скоробогатов А.А..

В 1992 году Elkasabgy N.M. был сделан вывод о перспективности диагностирования АД на основе анализа его аксиального магнитного потока. Вклад в развитие методов функциональной диагностики АД на основе анализа аксиального магнитного потока внесли Kliman G. B., Elkasabgy, N.M., Negrea M., KokkoVoitto, Romary R., Fireteanu V..

Исследованиям радиальной составляющей ВМП АД, направленным разработку методов диагностирования ОР АД, уделяется куда меньше внимания. По данной тематике можно выделить работы Romary R. и Fireteanu V., но в целом следует отметить, что данное направление пока плохо изучено. Все основные результаты были получены на математических моделях или в лабораторных условиях, а результаты, полученные в условиях реальной эксплуатации, отсутствуют. Пока плохо изучено влияние на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов, таких как несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора и т.д. Не раскрыты многие аспекты практического применения радиальной составляющей ВМП для диагностирования АД.

**Целью работы** является поиск и исследование новых диагностических признаков повреждения короткозамкнутых ОР, разработка метода

диагностирования ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

В работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка математических моделей, позволяющих исследовать ВМП и магнитное поле воздушного зазора АД.
2. Разработка скалярного анализатора спектра для автоматизированного анализа спектров ВМП и магнитного поля воздушного зазора АД.
3. Разработка экспериментально-лабораторного стенда, позволяющего исследовать ВМП и магнитное поле воздушного зазора АД.
4. Исследовать влияние на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов.
5. Разработка метода, алгоритма и программного обеспечения для функционального диагностирования короткозамкнутой обмотки ротора на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП АД.

**Объектом исследования являются** АД 6 и 0,4 кВ с короткозамкнутым ротором, используемые в системах собственных нужд электрических станций.

**Предметом исследования является** динамика изменения гармоник в спектре радиальной составляющей ВМП АД при повреждении ОР и влиянии эксплуатационных факторов.

**Методология и методы исследований.** Поставленные задачи решались с использованием методов спектрального анализа сигналов, конечных элементов, теории магнитного поля, обработки экспериментальных данных, методов математического и физического моделирования.

**Научную новизну** работы представляют:

1. Результаты исследования влияния на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов, таких как несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора.
2. Диагностический параметр обрыва стержней короткозамкнутой ОР – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.

3. Метод и алгоритм автоматической коррекции времени записи сигнала, который, по сравнению с традиционным анализом на основе быстрого преобразования Фурье, позволяет сократить время записи сигнала, обеспечивая высокую точность определения амплитуд и частот любых гармонических составляющих спектра.

4. Методика функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

#### **Теоретическая значимость работы:**

1. Изложены результаты исследования влияния на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов (несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора).

2. Доказана целесообразность использования в качестве диагностического параметра обрыва стержней ОР АД средней мощности сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.

3. Изложены основные принципы функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

#### **Практическую ценность работы представляют:**

1. Скалярный анализатор спектра, основанный на алгоритме автокоррекции времени записи сигнала, позволяющий определять скольжение, а также амплитуды и частоты гармоник, генерируемых АД.

2. Программно-аппаратный комплекс для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

3. Экспериментально-лабораторный стенд, позволяющий исследовать работу АД при различных видах повреждений ОР и влиянии эксплуатационных факторов.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».** Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

**В части формулы специальности:** «... В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии ...». Результаты диссертационного исследования позволят повысить надежность производства электроэнергии благодаря уменьшению числа внезапных отказов асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций за счет раннего выявления обрывов стержней обмотки ротора.

**В части области исследования:**

**п. 5** «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» соответствуют: диагностический параметр обрыва стержней короткозамкнутой ОР; разработка методики практической реализации функциональной диагностики короткозамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП; разработка программно-аппаратного комплекса для функционального диагностирования короткозамкнутой обмотки ротора АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП;

**п. 6** «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствуют: разработанные математические модели, позволяющие исследовать влияние на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов, таких как несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора; разработанный экспериментально-лабораторный стенд, позволяющий исследовать работу АД при различных повреждениях ОР;

**п. 13** «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют: разработка программно-аппаратного комплекса для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП; разработанные

алгоритм и компьютерная программа для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД; разработанная методика определения порогового значения диагностического параметра обрыва стержней короткозамкнутой ОР АД с помощью математического моделирования.

**Реализация результатов работы.** Полученные результаты используются:

1. В микропроцессорном устройстве защиты «Сириус-2-Д» производства ЗАО «РАДИУС Автоматика».

2. На основе экспериментального стенда разработана лабораторная работа «Методы оперативного контроля состояния обмотки ротора асинхронного электродвигателя», которая внедрена в учебный процесс ИГЭУ по курсу «Системы автоматизированного управления и диагностирования в электроэнергетике».

3. На основе разработанных теоретических и практических результатов работы на кафедре «Диагностика и управление техническим состоянием энергетического оборудования» ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Минэнерго России проводятся занятия по повышению квалификации специалистов диагностических служб генерирующих компаний топливно-энергетического комплекса России.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования влияния обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов на спектр радиальной составляющей ВМП АД.

2. Диагностический параметр обрыва стержней ОР АД – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.

3. Методика функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

4. Метод определения скольжения, а также амплитуд и частот гармоник, генерируемых АД, основанный на алгоритме автокоррекции времени записи сигнала.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается, совпадением результатов работы, полученных на разработанных математических моделях с

данными экспериментов, проведенных на лабораторных физических моделях и в условиях реальной эксплуатации электрических станций.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на региональных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (г. Иваново 2009–2017 гг.); XV–XIX международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 гг.); научно-практических семинарах «Пожарная безопасность и надежность электроустановок и электрических систем» (г. Иваново 2012–2014 гг.); выставке UPGrid 2012 «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие», (г. Москва, 2012 г.), международном научно-техническом семинаре РАН «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г. Иркутск, 2013), международном научно-техническом семинаре «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования» (г. Санкт-Петербург, 2012–2014 гг.).

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 35 работ, из них 6 в журналах, рекомендованных ВАК, 2 в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, получено 3 патента РФ на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 234 страницы, в тексте содержится 118 рисунков и 98 таблиц.

# ГЛАВА 1. ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ И МЕТОДЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## 1.1. Повреждаемость короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей

Надежность работы тепловых электростанций в значительной мере зависит от надежности системы электроснабжения собственных нужд (СЭСН). Причинами отказов в СЭСН являются: ошибки персонала – 26 %, неправильные действия защит – 12 %, выход из строя резервных вводов - 27 %, отключение основного ввода – 13 %, внешние аварии – 11% и др. Общее число вынужденных остановов отечественных блоков из-за отказов вспомогательного оборудования СЭСН на тепловых электростанциях составляет 27,4%. При этом отключения распределились так: из-за ошибок персонала – 19%, трансформаторов – 33%, электродвигателей – 24% и кабельных линий – 24 % случаев [1, 2].

АД нередко работают в весьма тяжелых условиях, при неудовлетворительном обслуживании или совершенно без какого-либо ухода. Поэтому в большинстве случаев причинами отказов асинхронных двигателей являются неправильное их применение (15–35% отказов), недостатки эксплуатации (35–50% отказов) или низкое качество ремонта. Примерно 30–35% отказов происходит вследствие недостатков конструкции и технологии производства двигателей. Лишь 10–12% двигателей выходят из строя вследствие естественных процессов старения и износа [2, 3].

Однако для АД, работающих в условиях частых пусков, износные отказы могут наступать уже через 2,5-4 года эксплуатации. Начало износных отказов для АД СЭСН лежит в диапазоне 2,6–7,7 лет, причем меньшие значения соответствуют АД с тяжелыми режимами работы (дробилки, дымососы, мельницы и т.д.).

Установлено, что рост числа пусков приводит к снижению срока службы АД в 2,5–8,6 раза [2].

Для механизмов СЭСН характерна большая разница в числе пусков за год. Так, для мельниц она составляет от 148 до 562, а для дробилок от 412 до 1103, т.е. количество пусков отличается в 2,7–3,8 раза. Различие в числе пусков приводит к неравномерной сработке ресурса АД [2].

Одним из наиболее уязвимых узлов АД, работающих с тяжелыми условиями пуска, является короткозамкнутая обмотка ротора (ОР). Статистический анализ повреждаемости высоковольтных АД СЭСН тепловых электростанций, проведенный в работах [4–6], свидетельствует о высокой повреждаемости короткозамкнутых ОР, причем свыше 80 % их повреждений приходится на обрывы стержней [7].

Согласно [8], на мощных высоковольтных АД, работающих с длительными пусками, порядка 30 % отказов обусловлены неисправностями короткозамкнутой ОР.

В работе [9] приведены данные исследований, проведенных на Экибастузских ГРЭС-1, ГРЭС-2, Аксуской ГРЭС и Павлодарских ТЭЦ-3 и ТЭЦ-2, согласно которым порядка 35–40 % АД работают с поврежденной короткозамкнутой обмоткой ротора.

В нашей стране не проводилось крупномасштабных исследований повреждаемости электродвигателей, поэтому трудно судить о реальном распределении причин отказов АД отечественного производства. Ввиду отсутствия таких данных можно рассмотреть зарубежную статистику повреждаемости электродвигателей.

Так, по данным крупномасштабного исследования [35], проведенного компанией General Electric Company совместно с EPRI (Electric Power Research Institute) и основанного на 10 годах (с 1969 по 1979 годы) наблюдения за 4797 электродвигателями мощностью 100 л.с. и выше, установленных на электростанциях различных типов, отказы АД, обусловленные повреждениями ОР, составляют 9% от общего числа отказов.

По данным более позднего исследования, проведенного Институтом Инженеров Электротехники и Электроники (IEEE) [10, 11] и основанного на длительном наблюдении за электродвигателями мощностью 200 л.с. и выше и возрастом не более 15 лет (всего 1141 АД), установленных на 75 электростанциях и 33 промышленных предприятиях, порядка 10 % отказов АД обусловлены повреждениями короткозамкнутой обмотки ротора.

В качестве основных причин повреждения ОР можно выделить следующие [14–21]:

- конструктивные недостатки;
- деформации и разрывы деталей клеток от механических перенапряжений в результате быстрого и неравномерного нагрева в процессе пуска двигателя (80 % всех повреждений короткозамкнутых обмоток являются следствием этого фактора);
- значительные электродинамические воздействия в процессе пуска;
- неправильная эксплуатация (например, двигатели, рассчитанные на легкий пуск, иногда работают в установках с тяжелым пуском);
- некачественная пайка;
- низкое качество литья;
- частые повторные пуски АД из горячего состояния (в этом случае перегревы обмоток достигают наивысших значений, в особенности в двигателях с тяжелыми условиями пуска);
- включение АД, вращающихся в момент пуска в обратную сторону, или резкие изменения нагрузки на валу ротора.

В настоящее время повреждения обмотки ротора выявляются в основном в период капитальных ремонтов. Большая периодичность ремонтов не позволяет своевременно определить дефекты обмотки ротора, что часто приводит к работе АД с оборванными стержнями и другими дефектами [12].

При эксплуатации АДс поврежденной ОР возрастают потребляемая мощность и вибрация, что сказывается на продолжительности работы

подшипников и тепловом режиме работы машины. Также могут возникать проблемы с пуском АД. В [9, 13] произведены расчеты, которые доказывают, что при длительной эксплуатации АД даже с одним оборванным стержнем в ОР, годовые потери, вызванные перерасходом электроэнергии, могут превышать стоимость самого двигателя.

Наибольшую опасность представляют повреждения составных (сварных) ОР. При обрыве стержня нагрузка перераспределяется на здоровые проводники. Основная нагрузка ложится на стержни, соседние с оборванным. Таким образом, обрыв одного проводника, в конечном итоге чаще всего приводит к повреждению и других стержней. Со временем оборванный стержень может отогнуться (как правило, при пуске) и повредить обмотку статора, что приведет к катастрофическим последствиям для электродвигателя (рис.1.1, 1.2), требующим капитального ремонта или замены поврежденного АД на новый.



Рис. 1.1. Обрыв стержней обмотки ротора двигателя АНЗ-4-16-45-10



Рис.1.2. Повреждение обмотки статора двигателя АНЗ-4-16-45-10 из-за обрыва стержней обмотки ротора

В качестве реального примера последствий обрыва стержней ОР, далее представлено описание отказа двигателя молотковой дробилки АНЗ-4-16-45-10 мощностью 1200 кВт на одной из ТЭЦ города Иваново, где подобная проблема носит систематический характер.

В ходе осмотра машины было установлено следующее:

- оборваны четыре стержня «беличьей клетки» ротора (два стержня в месте впайки в короткозамыкающее кольцо со стороны свободного конца вала. Сломаны зубцы полузакрытых пазов этих стержней на  $\frac{1}{2}$  длины сердечника; два стержня с двух сторон в месте впайки в короткозамыкающие кольца. Сломаны зубцы полузакрытых пазов данных стержней на  $\frac{2}{3}$  длины сердечника (рис. 1.1);
- зубцы первого полузакрытого паза сломаны на  $\frac{1}{2}$  длины сердечника. По остальной длине паза зубцы выгнуты в сторону воздушного зазора;

- повреждена изоляция внутренней стороны лобовых частей обмотки статора в месте выхода из пазов по всей окружности со стороны механизма (рис. 1.2);

- выгорела изоляция трех секций в верхней части обмотки статора в месте выхода обмотки из пазов;

- на стержнях трех верхних секций имеются следы короткого замыкания;

- лобовая часть одной секции обмотки статора сильно погнута в месте выхода из паза в сторону направления вращения ротора.

На основании выясненных при расследовании фактов установлено:

- повреждение изоляции лобовых частей обмотки статора электродвигателя произошло вследствие обрыва стержня «беличьей клетки» ротора и задевания его за обмотку статора;

- обрыв стержней произошел в результате больших динамических усилий, возникающих при пуске электродвигателя молотковой дробилки.

При стоимости самого двигателя порядка 3,5 млн. рублей, стоимость ремонта составила сумму порядка 800 т.р. (на 2009 год). В случае своевременного обнаружения обрыва потребовался бы только небольшой ремонт обмотки ротора силами самого предприятия.

Проблема обрывов стержней характерна для АД электростанций, работающих с тяжелыми условиями пуска, и в первую очередь касается двигателей механизмов топливоприготовления (дробилки, мельницы), а также механизмов тягодутьевого тракта (дымососов и дутьевых вентиляторов).

Ввиду отсутствия актуальных данных по повреждаемости АД был произведен опрос мастеров ряда энергоремонтных предприятий. По их наблюдениям имеется тенденция к росту повреждаемости АД, причем наибольшие нарекания заслужили не старые двигатели, а новые. Было отмечено существенное ухудшение качества заливки литых ОР и применение алюминия низкого качества. Не редкостью стали случаи, когда у новых АД после нескольких дней работы наблюдались трудности с пуском и существенное ухудшение эксплуатационных характеристик, что объяснялось отгоранием стержней ОР из-за пузырьков воздуха,

образовавшихся при заливке обмотки. Такие неисправности может быть очень сложно выявить. Таким образом, по мнению мастеров энергоремонтных предприятий, актуальной задачей является выявление обрывов стержней не только составных, но также и литых короткозамкнутых ОР АД.

Повреждения короткозамкнутой ОР, как правило, развиваются довольно медленно, поэтому выявление данного типа неисправностей наиболее целесообразно на раннем этапе их развития, причем процесс диагностирования должен выполняться на работающем двигателе, не прерывая технологический процесс. Такого рода задачи решаются с помощью методов и средств функциональной диагностики.

Таким образом, проблема своевременного выявления неисправностей ОР АД в процессе его работы является актуальной и требует решения.

## **1.2. Методы функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей**

Устройства и системы функциональной диагностики, так же, как и релейная защита, решают задачу распознавания повреждений электрооборудования. Основное отличие устройств и систем функционального контроля от релейной защиты – распознавание повреждений на ранней стадии их развития с целью предупреждения персонала о необходимости своевременной разгрузки оборудования и вывода его в ремонт [22].

Основные известные методы функциональной диагностики ОР АД рассмотрены далее. Все методы разделены на группы по виду регистрируемого сигнала.

### **1.2.1. Методы, основанные на анализе электромагнитного поля внутри двигателя**

1. В [6] предложен метод выявления обрывов стержней ОР АД, основанный на контроле величины высокочастотной составляющей электромагнитного поля вокруг обмотки ротора, наводимой в результате горения дуги между контактами оборванного стержня. На основе данного метода разработано устройство [6, 30] для выявления обрывов стержней обмотки ротора АД. Принцип действия устройства основан на выявлении, с помощью электромагнитного датчика, размещаемого в зоне лобовых частей АД, высокочастотных составляющих магнитного поля, возникающих при образовании дуги в месте обрыва стержня обмотки ротора. В обмотке датчика при обрыве стержня наводится высокочастотная ЭДС, амплитуда которой промодулирована низкочастотным сигналом с удвоенной частотой тока в роторе. Данный метод позволяет выявлять повреждение даже одного стержня и наиболее эффективен в пусковом режиме двигателя.

Основными недостатками данного метода являются низкая помехозащищенность, так как устройство может реагировать на все процессы, сопровождающиеся искрением и дугообразованием и необходимость установки датчика внутри АД, наличие которого может послужить причиной аварии и незапланированного останова электродвигателя.

2. В [4] предложен метод контроля состояния обмотки ротора, основанный на измерении величины магнитного потока вдоль периметра ротора, наводимого от каждого стержня. Обрыв стержня обмотки ротора приводит к резкому уменьшению магнитного поля над ним. Разница между амплитудой магнитного потока около исправного и поврежденного стержней является диагностическим признаком их повреждения. Контролируя величину магнитного поля по периметру ротора на работающем двигателе, можно определить поврежденные стержни и их расположение на роторе друг относительно друга. На основе данного метода разработано устройство, использующее два входных

сигнала: от электромагнитного датчика, установленного вблизи лобовой части обмотки статора, и датчика оборотов, расположенного снаружи АД [26].

3. В [34] предложена вариация вышеуказанного метода, отличающаяся обработкой и анализом диагностического сигнала. В этом способе зарегистрированный сигнал пропускается через режекторный фильтр, удаляющий из сигнала гармонику на частоте сети и зубцовые гармонические ротора. С помощью датчика оборотов, который подает сигнал синхронизации после полного оборота вала ротора относительно нанесенной метки, из отфильтрованного сигнала выделяют участок, включающий в себя несколько периодов вращения ротора. Выбранный участок сигнала выпрямляется, после чего разбивается на отрезки с длительностью, равной периоду вращения ротора. Далее формируется усредненный сигнал с длительностью, равной периоду вращения ротора, который представляет собой среднее арифметическое суммы мгновенных значений отрезков сигналов в соответствующих друг другу моментах времени. Данная процедура позволяет выделить информативный сигнал на фоне шума. По наличию статистически значимых пиков в этом усредненном сигнале определяют наличие неисправности обмотки ротора, расположение таких пиков будет соответствовать расположению оборванного стержня относительно установленной метки на роторе.

4. В [5] предложен метод, названный дифференциальным, основанный на спектральном анализе магнитного поля воздушного зазора, являющийся дальнейшим развитием методов, описанных в [4, 34]. В данном методе из общего сигнала, получаемого с датчика, установленного в воздушном зазоре двигателя, выделяется диагностический сигнал – временная зависимость тангенциальной составляющей магнитной индукции, наводимая токами от фиктивной обмотки ротора (ФОР). Частоты, гармоник магнитного поля, генерируемых токами ФОР, определяются по следующему выражению [27, 28]:

$$f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)} = f_c \cdot \left( \frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right), \quad (1.1)$$

где  $f_c$  – частота сети;  $p$  – число пар полюсов;  $\nu$  – порядок гармоники;  $s$  – скольжение.

Диагностическим признаком, указывающим на обрыв стержней ОР, является появление пиков, пульсирующих с частотой скольжения.

На рис 1.3 представлена форма ДС при исправной обмотке ротора, на рис 1.4, 1.5 с одним и двумя оборванными стержнями соответственно. На рис 1.4, 1.5 цифрами обозначены пики, соответствующие номерам оборванных стержней.

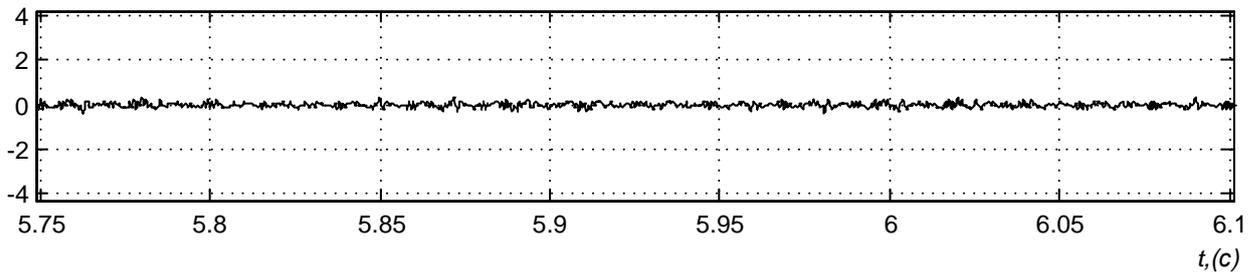


Рис. 1.3. Форма диагностического сигнала АД с исправной ОР

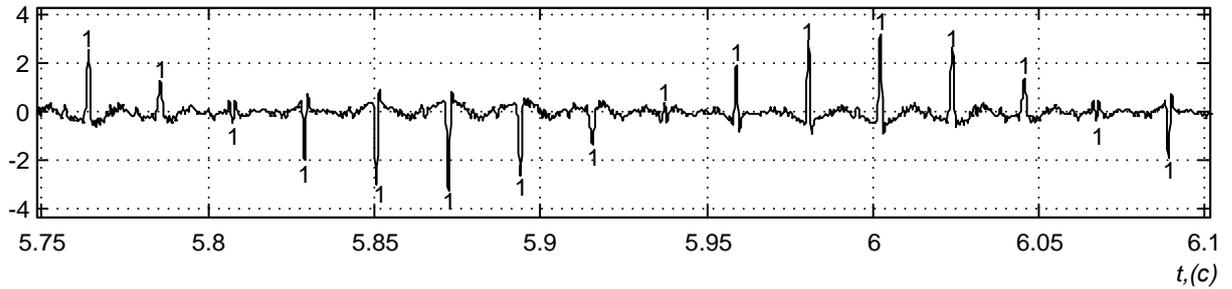


Рис. 1.4. Форма диагностического сигнала АД с одним оборванным стержнем в ОР

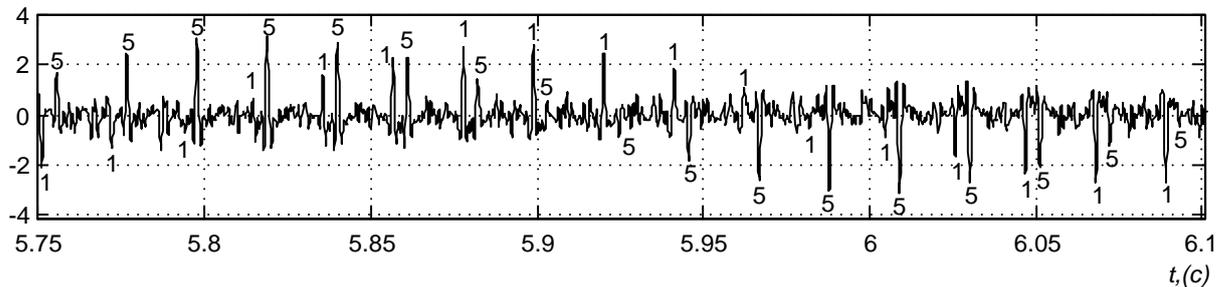


Рис. 1.5. Форма диагностического сигнала АД с двумя оборванными стержнями в ОР

Количество оборванных стержней при этом численно равно количеству пиков на промежутке равном периоду вращения ротора.

Для реализации данного метода требуется определение частоты сети и скольжения.

Основным недостатком методов 2–4, аналогично 1, является необходимость установки датчика внутри АД.

### 1.2.2. Методы, основанные на анализе тока статора

1. В [31] предлагается определять состояние ОР по амплитуде пульсаций фазного тока обмотки статора с частотой скольжения (рис 1.6).

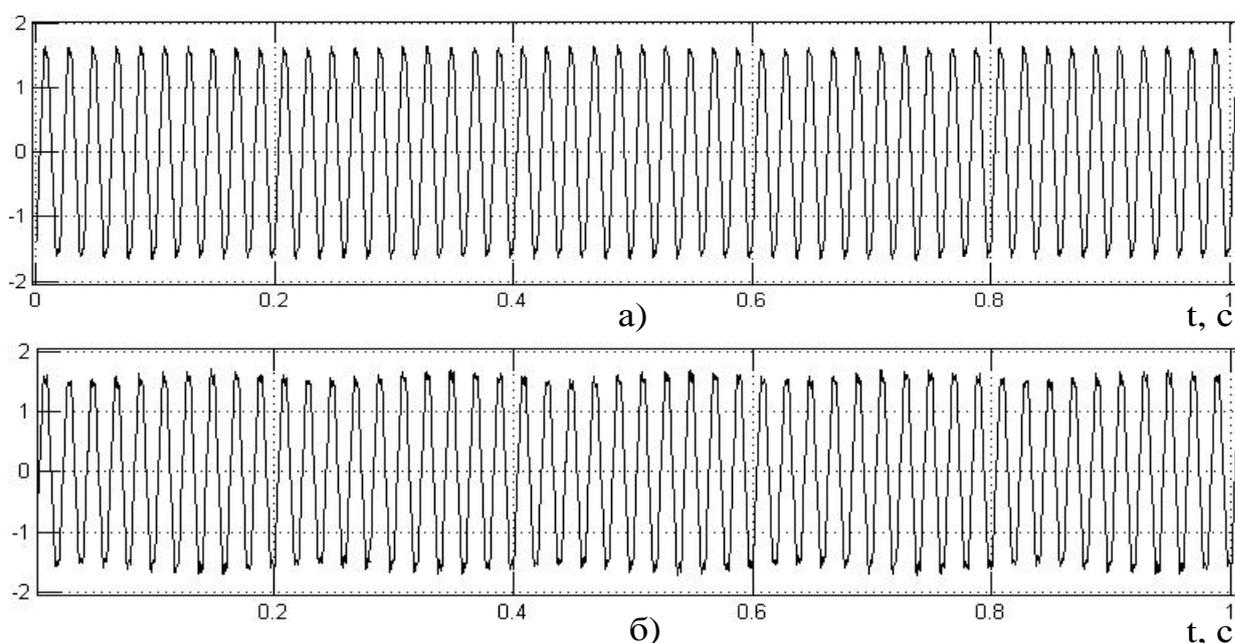


Рис 1.6. Форма фазного тока статора:

а – исправная ОР; б – обмотка ротора с двумя оборванными стержнями

Недостаток. Очень сложно определить неисправность, так как значительные пульсации тока возникают при большом числе оборванных стержней, а при обрыве одного стержня пульсации будут практически незаметны.

2. В [32] предложен способ, основанный на измерении пульсаций амплитуды фазного тока статора в пусковом режиме. В данном методе предлагается сравнивать текущее и предыдущее значения амплитуд фазного тока.

По величине этой разности делается вывод о состоянии обмотки ротора. На основе этого метода разработано устройство для выявления обрывов роторных стержней АД «ВОРС» [33] и предложена методика диагностики состояния обмоток асинхронных электродвигателей в процессе пуска. Подключение устройства к АД осуществляется при помощи разъемной клещевой приставки в цепь вторичной обмотки трансформатора тока, установленного на кабеле. Данное устройство не позволяет диагностировать АД с малым временем пуска, ввиду невозможности отстройки от апериодической составляющей тока статора.

3. В [37] предлагается метод, основанный на измерении пульсаций модуля результирующего вектора тока статора  $i_s$ , который определяется следующим образом:

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}, \quad (1.2)$$

где  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  – действующие значения токов в фазах А, В, и С статора.

В нормальном режиме работы модуль результирующего вектора тока статора – величина постоянная. При обрывах стержней она начинает колебаться, при этом амплитуда колебания имеет большее значение, чем у способа №1, но меньшее, чем у способа контроля в пусковом режиме № 2, основанного на появлении в токе статора токов обратной последовательности.

На основании данного метода разработано устройство контроля исправности стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД, в котором величина потребляемого тока контролируется путём сравнения с током неповрежденного АД [38].

4. Метод спектрального анализа тока статора, больше известный как Motor Current Signature Analysis (MCSA), появился в США в конце 80-х годов прошлого века и превратился в очень мощное направление технической диагностики электрических вращающихся машин. Популярность спектрального анализа тока статора была обусловлена тем, что данный метод позволяет с достаточно высокой достоверностью выявлять целый ряд неисправностей электродвигателя. Однако по какой-то причине в нашей стране метод

спектрального анализа тока статора мало известен и, несмотря на все преимущества, не нашел широкого практического применения. Основные особенности данного метода представлены в работах [5, 11, 12, 39–64].

Метод спектрального анализа тока статора основан на выполнении мониторинга потребляемого тока с последующим выполнением специального спектрального анализа полученного сигнала, что позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Физический принцип, положенный в основу этого метода, заключается в том, что любые возмущения в работе электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним устройства приводят к изменениям магнитного потока в воздушном зазоре электрической машины и, следовательно, к изменениям в спектре потребляемого электродвигателем тока. Таким образом, наличие в спектре тока статора асинхронного электродвигателя характерных частот определенной величины свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним механического устройства [44].

В работах [11, 39–52] для выявления повреждений ОР предлагается использовать гармонические составляющие, возникающие вокруг частоты источника питания (рис 1.7) [11]. Частоты данных гармонических составляющих спектра тока статора определяются по следующему выражению:

$$f_{oc} = f_c \cdot (1 \pm 2s). \quad (1.3)$$

При этом считается [40], что составляющая « $-2sf_c$ » вызвана токами обратной последовательности, а « $+2sf_c$ » – колебаниями скорости вращения ротора.

Диагностическим признаком повреждения ОР при этом является увеличение амплитуд гармоник (см. рис 1.7) с частотой, определяемой выражением (1.3).

Количество оборванных стержней при этом можно приблизительно оценить по следующему выражению [40, 41]:

$$n = \frac{2 \cdot Z_p}{\frac{N}{10^{20}} + p}, \quad (1.4)$$

где  $Z_p$  – число стержней в обмотке ротора;  $p$  – число пар полюсов;  $N$  – разница в  $\text{дБ}$  между средним арифметическим амплитуд боковых частот и амплитудой частоты источника питания.

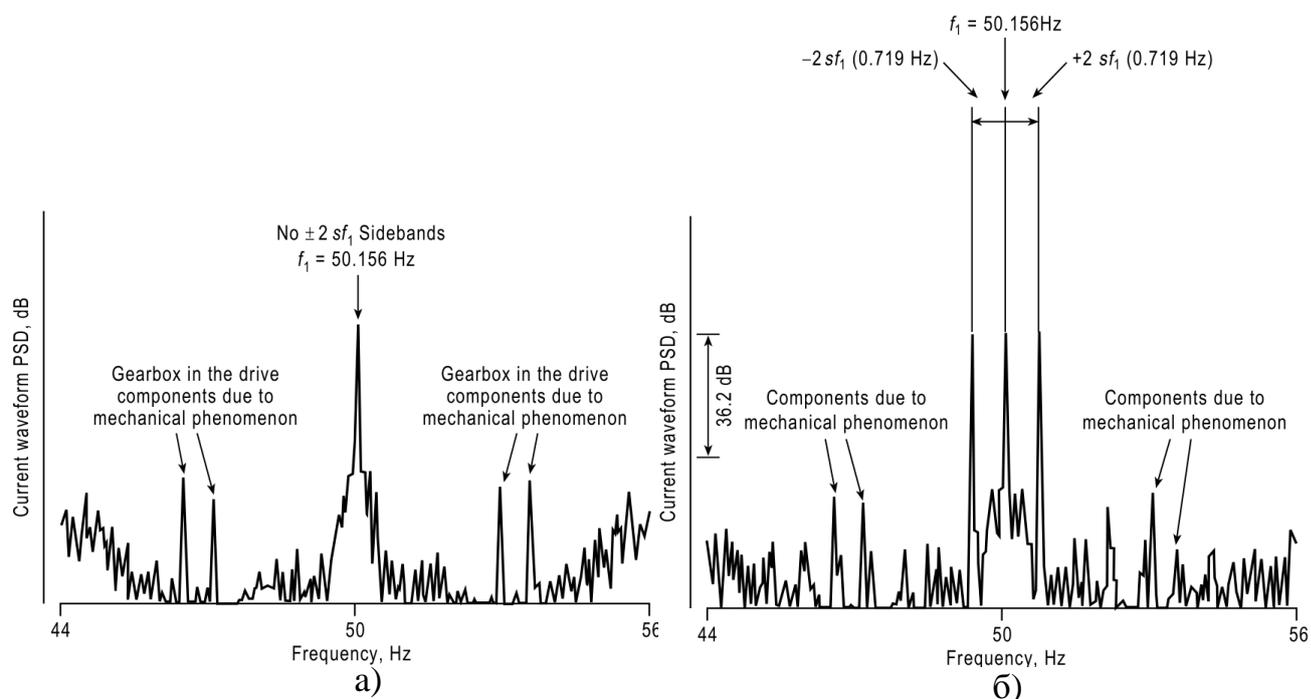


Рис 1.7. Спектр фазного тока статора:

а – исправная ОР; б – ОР имеет оборванные стержни

В работах [5, 12, 36, 53–57] для выявления оборванных стержней предлагается использовать гармонические составляющие спектра тока статора, частота которых определяется выражением (1.1). При этом, согласно [36] использоваться должны только те гармоники, для которых  $v/p = 1, 5, 7, 11, 13...$

Диагностическим признаком наличия оборванных стержней является значительное увеличение амплитуд этих гармоник (рис. 1.8).

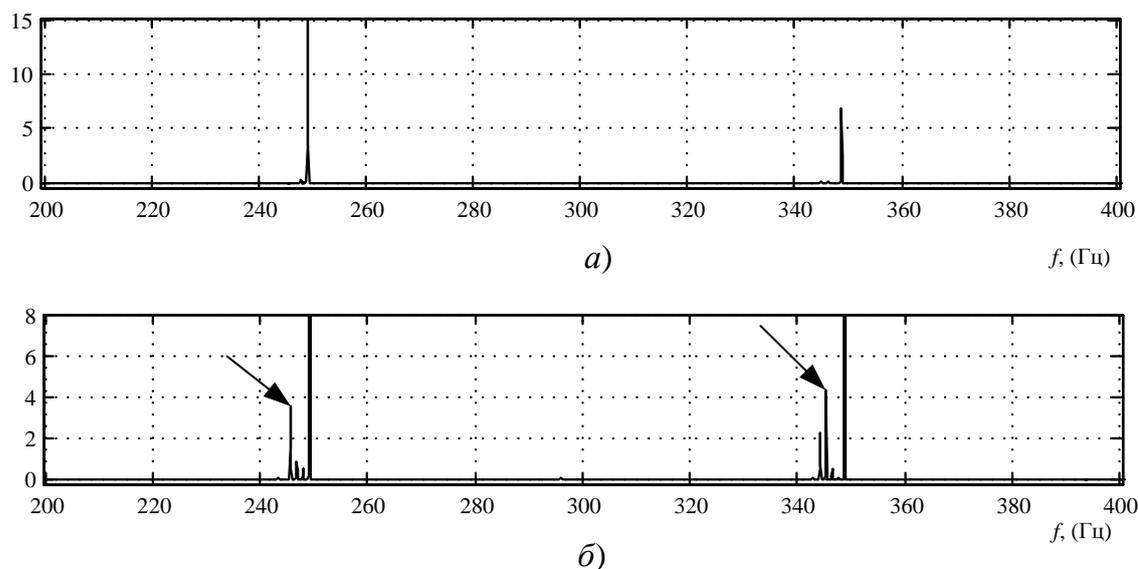


Рис. 1.8. Спектр тока статора АД на отрезке от 200 до 400 Гц при нагрузке 0:  
 а – обмотка ротора исправна; б – обмотка ротора имеет два оборванных стержня

5. Частным случаем спектрального анализа тока статора является метод анализа комплексного вектора Парка [59–61].

Составляющие вектора Парка  $i_d$  и  $i_q$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}}i_A - \sqrt{\frac{1}{6}}i_B - \sqrt{\frac{1}{6}}i_C, \\
 i_q &= \sqrt{\frac{1}{2}}i_B - \sqrt{\frac{1}{2}}i_C.
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Годограф вектора Парка исправного двигателя представляет собой идеальный круг, повреждение ОР АД приводит к изменению его формы. Для реализации метода требуется одновременное измерение тока статора как минимум с двух фаз.

Однако в представленном выше способе неудобно производить анализ данных, поэтому на практике используется спектральный анализ модуля вектора Парка, который можно определить по следующему выражению

$$|PI| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}.
 \tag{1.6}$$

Наличие электрических и механических неисправностей приводит к изменениям магнитного потока (амплитудной модуляции) в воздушном зазоре

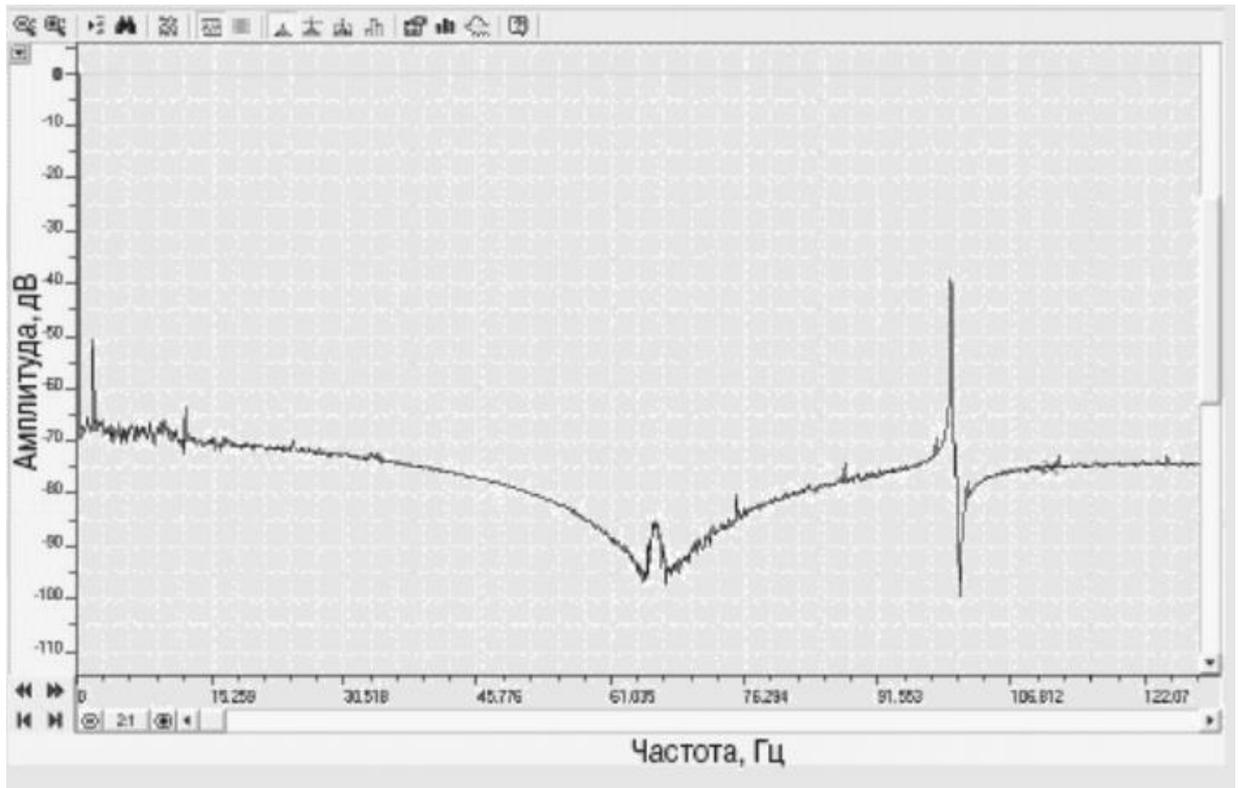
электрической машины, что дает возможность выявить гармоники тока, характерные для неисправностей оборудования. В отличие от простого спектрального анализа тока, при формировании спектров модуля вектора Парка любая модулируемая амплитудной модуляцией характерная частота  $f$  учитывается в спектре вектора Парка только один раз [60, 61].

В [60, 61], помимо анализа спектра модуля вектора Парка токов, предлагается также использовать модуль вектора Парка напряжений. Так как питающее напряжение не является идеально синусоидальным, поэтому в получаемых спектрах модуля вектора Парка токов и напряжений присутствуют гармоники, обусловленные качеством питающего напряжения, но неисправности электродвигателя и механической нагрузки вызывают соответствующие гармоники только в спектре тока.

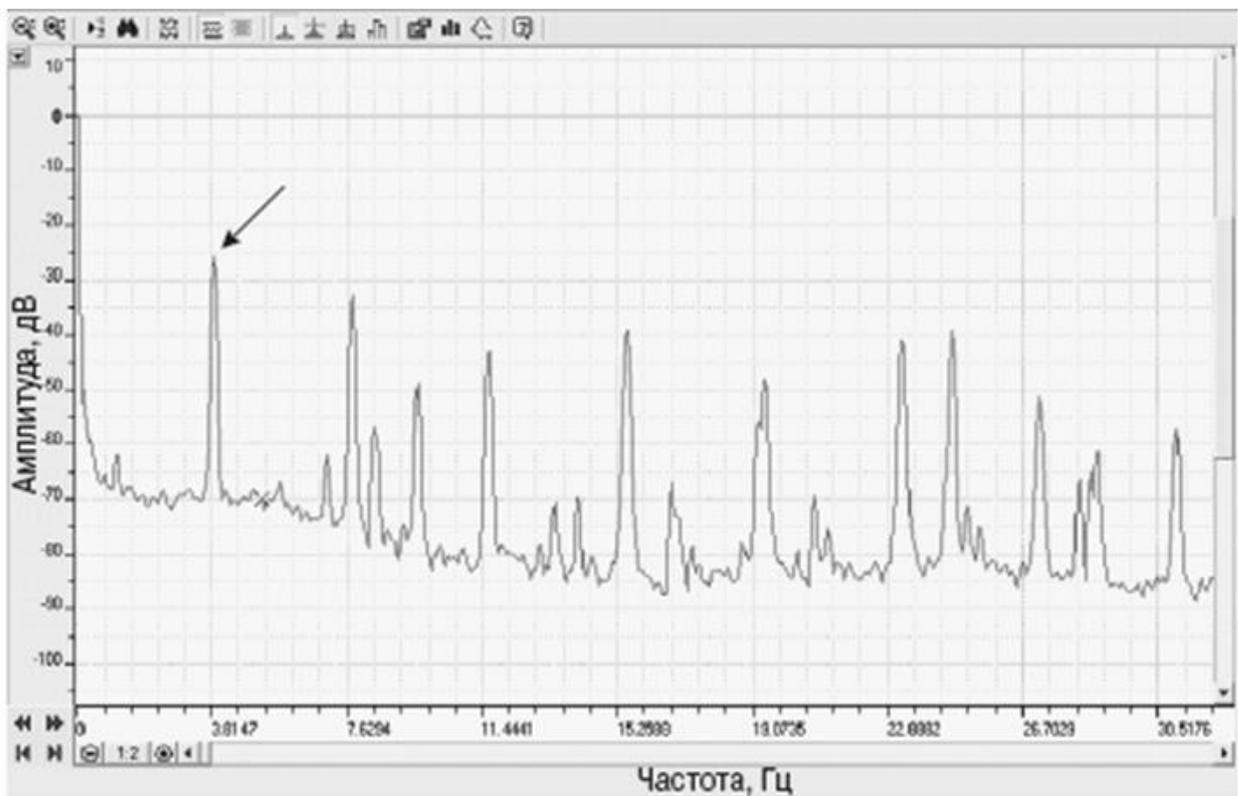
При совпадении всех линий в спектрах модулей вектора Парка токов и напряжений делается вывод о соответствии спектра тока питающему напряжению в электрической цепи электродвигателя. При выявлении линий, присутствующих в спектре тока и отсутствующих в спектре напряжения, можно сделать вывод о несоответствии спектра тока питающему напряжению в электрической цепи электродвигателя, которое может быть обусловлено неисправностью.

Характер и степень развития неисправности выявляются путем сравнения значений амплитуд модуля вектора Парка тока на характерных частотах со значением амплитуды на частоте 0 Гц. На рис. 1.9 показаны спектры модуля вектора Парка исправного АД и АД с поврежденными стержнями ротора.

Общим недостатком методов диагностирования, основанных на анализе тока статора, является необходимость доступа к цепям питания АД, что в случае мощных высоковольтных АД бывает не всегда возможно. Снятие сигнала с трансформаторов тока, установленных в комплектных распределительных устройствах, также не всегда возможно, так как на электростанциях часто ставят измерительные преобразователи, после которых сигнал становится непригоден для анализа. Таким образом, методы диагностики, основанные на анализе тока статора, больше подходят для стационарных устройств диагностики.



а)



б)

Рис. 1.9. Спектры модуля вектора Парка тока АД:  
а – исправный АД; б – АД с повреждениями стержней ОР

### 1.2.3. Методы, основанные на анализе внешнего магнитного поля

В 1987 году в работе [70] впервые было предложено использовать измерение аксиального(осевого) магнитного потока АД для контроля обмоток статора и ротора. В 1988 году в работе [36] был предложен совместный анализ тока статора и аксиального магнитного потока с целью выявления неисправностей АД и, в частности, повреждений ОП. Позднее в 1992 году в работе [44] на основании более детального исследования был сделан вывод о перспективности диагностирования АД на основе анализа его аксиального магнитного потока.

Однако впоследствии развитие получил метод MCSA, а методами диагностирования АД по внешнему магнитному полю практически никто не занимался. За рубежом с середины 2000-х годов интерес к данному направлению начал усиливаться, что обусловило появление все большего числа публикаций по данной тематике.

В нашей стране в последнее время также появился интерес к данной тематике. В виду малой изученности, значительная часть научных работ посвящена исследованию ВМП АД или способам его уменьшения [25, 99–104]. Лишь малая научных публикаций посвящена изучению вопросов использования ВМП для диагностирования различных неисправностей АД, но следует заметить, что интерес к этому направлению растет.

В подавляющем большинстве работ для выявления неисправностей АД предлагается использовать спектральный анализ аксиального магнитного потока, измеряемого с помощью датчика магнитного потока. Датчик магнитного потока представляет собой кольцевую катушку без сердечника, которая устанавливается с торца двигателя, как это показано на рис. 1.10, при этом размеры катушки зависят от габаритов АД.

Для выявления повреждений ОП АД, как правило, предлагается использовать те же частотные составляющие, что и в MCSA. В работах [36, 65, 71–73, 77, 79] предлагается использовать гармонические составляющие аксиального магнитного

потока с частотами, определяемыми по выражению (1.1), а в работах [44, 76] – с частотами, определяемыми выражением (1.3). В работах [75, 77, 78] предлагается использовать низкочастотные составляющие аксиального магнитного потока с частотами  $sf_c$  и  $3sf_c$ .



Рис. 1.10. Измерение осевого магнитного потока

Радиальной составляющей ВМП АД уделяется куда меньше внимания.

В работах [29, 105] было проведено исследование влияния эксцентриситета ротора и повреждений ОР на радиальное ВМП. Был сделан вывод, что во ВМП содержатся информативные составляющие, которые могут быть использованы для определения состояния АД и его узлов.

В работах [23, 24] предлагается использовать спектральный анализ ВМП АД для выявления неисправностей обмотки статора.

В [74], показано, что радиальная составляющая ВМП, может быть использована для определения состояния ОР АД. Для определения неисправностей

ОР было предложено использовать высокочастотные составляющие, расположенные вблизи зубцовых гармоник ротора [84]. Сигнал регистрировать предлагается, опять же, с помощью кольцевой катушки, располагая ее вблизи АД, как это показано на рис. 1.11.

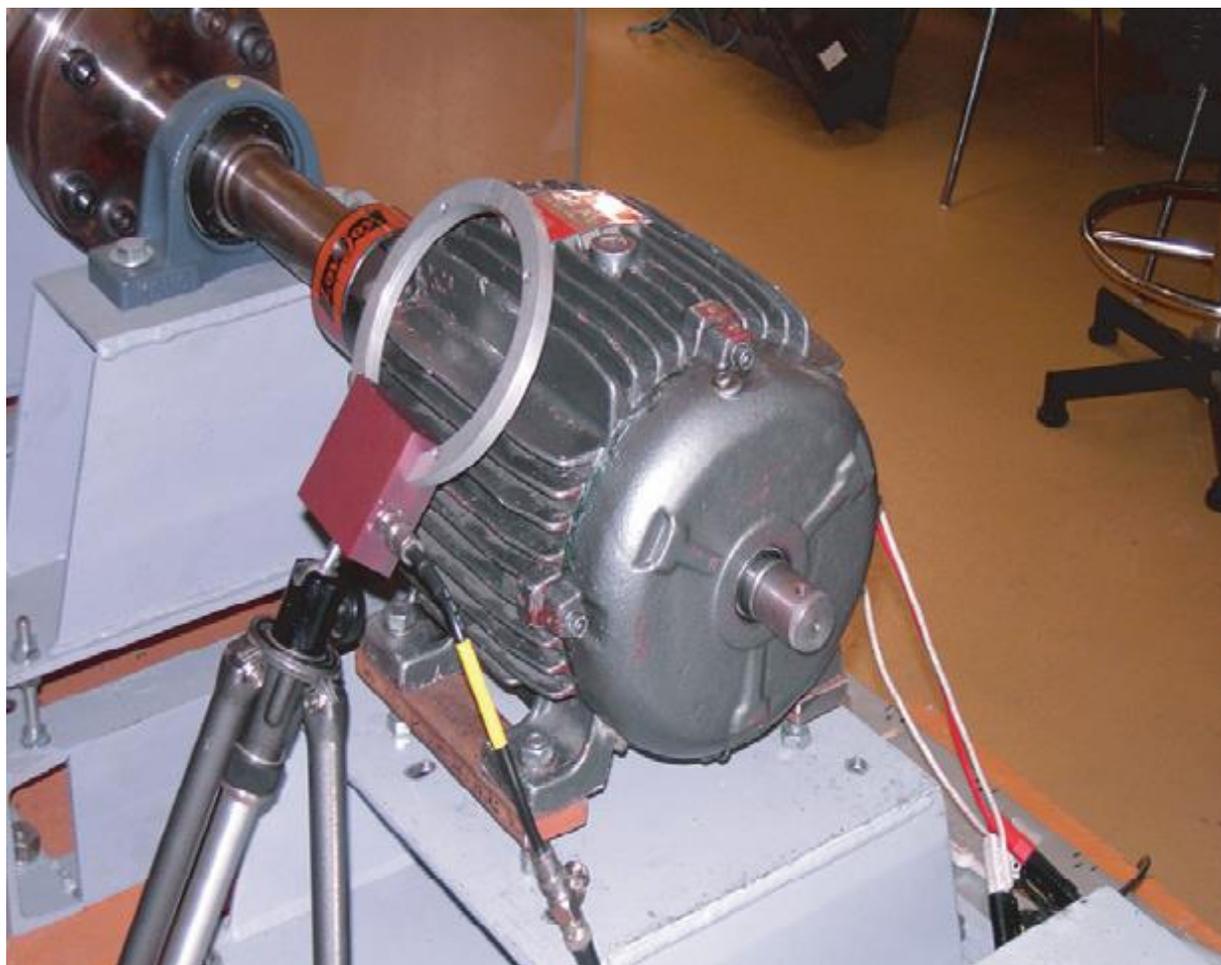


Рис. 1.11. Измерение радиального магнитного потока

В работах [80–83] для определения наличия повреждений ОР предлагается использовать низкочастотные составляющие  $sf_c$  и  $3sf_c$  радиального ВМП.

#### **1.2.4. Методы, основанные на анализе вибрации**

На сегодняшний день в нашей стране вибродиагностика является наиболее развитым и распространенным направлением в технической диагностике

электрических вращающихся машин. Имеется целый ряд отечественных компаний, выпускающих устройства для вибродиагностики электродвигателей, среди которых можно выделить ООО «Ассоциация ВАСТ», ООО «Вибро-Центр» и др.

1. Фирмой «ВАСТ» разработан метод [66], основанный на измерении вибрации корпуса АД в диапазонах частот, кратных частоте вращения ротора, и определении при этих дискретных составляющих спектра наличия и глубины модуляции двойной частотой скольжения. Сравнение полученной виброграммы с эталонной позволяет по глубине частотной модуляции идентифицировать дефект короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя (рис. 1.12).

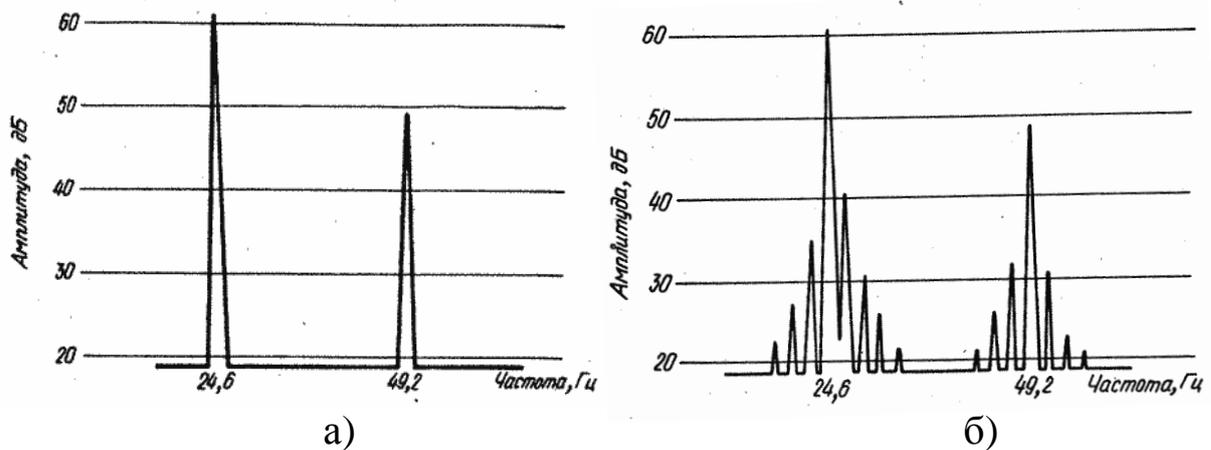


Рис 1.12. Спектр вибрации АД:

а – бездефектный АД; б – ОР имеет оборванные стержни

2. Фирмой «Вибро-Центр» используется метод [67], основанный выявлении спектре вибрации пиков вокруг основной гармоники частоты вращения ротора. В момент прохождения зоны отгоревшего стержня мимо полюса тяговое усилие скачком уменьшится, ротор чуть-чуть замедлится. В это время под полюс подойдет зона бездефектного стержня, в нем за счет возросшего скольжения будет большой ток, тяговое усилие возрастет, ротор чуть ускорится. Эти мини - ускорения и мини - замедления на спектре будут характеризоваться возникновением зубцов вокруг основной гармоники частоты вращения ротора.

Такой спектр для двигателя с частотой вращения ротора 2920 об/мин показан на рис 1.13.

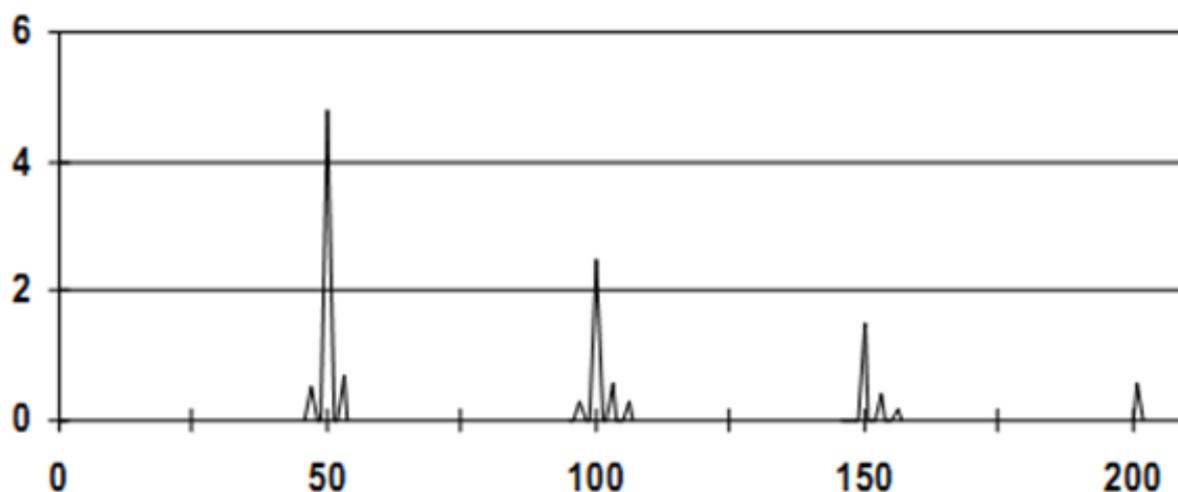


Рис. 1.13. Спектр вибрации АД с оборванным стержнем в ОР

### 1.2.5. Методы, основанные на измерении скольжения

1. В [68] предложен метод определения состояния короткозамкнутой ОР, основанный на измерении скольжения. Диагностическим признаком неисправности при этом является величина отклонения скольжения от заданной величины при текущей нагрузке на валу машины. Согласно [69] допустимым является отклонение скольжения на величину, не превышающую 20 % от номинального значения.

Причиной увеличения скольжения при обрыве стержней ОР является увеличение активного сопротивления АД, что приводит к уменьшению КПД. Так как КПД ротора равно  $\eta = 1 - s$ , то это приводит к росту скольжения. На основе этого метода разработано устройство, в котором датчик скольжения устанавливается на валу ротора.

2. В [5] предложено усовершенствование предыдущего метода путем измерения скольжения по зубцовым гармоникам ротора (ЗГР) тока статора. В сравнении с методом №1 данный метод позволяет определять скольжение с

большой точностью, а измерение тока статора позволяет учесть текущую нагрузку АД.

### **1.3. Выбор и обоснование задач дальнейших исследований**

Исходя из [106–108] и проведенного изучения литературных источников, на сегодняшний день для функциональной диагностики ОР АД собственных нужд электростанций наиболее пригодны 3 группы методов. Это методы, основанные на спектральном анализе вибрации, тока статора (MCSA), аксиальной или радиальной составляющей магнитного потока АД.

Как уже было упомянуто ранее, активная работа над созданием методов функциональной диагностики ОР АД на основе ВМП АД началась сравнительно недавно. Следует также отметить, что большинство этих методов основано на анализе аксиальной составляющей ВМП, при этом радиальной составляющей уделяется мало внимания.

В данной работе ставится задача разработки метода функциональной диагностики ОР АД по радиальной составляющей индукции ВМП в качестве альтернативы и дополнения к вибродиагностике и MCSA.

В качестве диагностического сигнала предполагается использовать радиальную составляющую индукции ВМП АД.

***Примечание. В дальнейшем под термином ВМП будет пониматься радиальная составляющая индукции ВМП***

В качестве основных методов исследования выбраны спектральный анализ сигналов и метод конечных элементов с применением ЭВМ.

В ходе выполнения диссертационной работы предполагается решить следующие задачи.

– Произвести анализ влияния обрывов стержней ОР на амплитудный спектр ВМП с целью выявления диагностических признаков наличия обрывов стержней ОР.

*Примечание. В дальнейшем под понятием спектр будет пониматься амплитудный спектр.*

– Произвести исследование влияния на спектр ВМП различных эксплуатационных факторов и определить наиболее надежные диагностические параметры, отражающие состояние ОР.

– Определить пороговые значения диагностических параметров, при которых ОР переходит из исправного состояния в неисправное.

Проведение экспериментальных исследований на мощных АД (особенно на высоковольтных) сопряжено с большими трудностями, поэтому вышеуказанные задачи должны решаться, в первую очередь, с помощью математического моделирования. Корректность математической модели может быть подтверждена с помощью физической модели на основе маломощного АД 0.4 кВ и с помощью измерений в условиях реальной эксплуатации. При этом для обеспечения достоверности необходимо сопоставление математической модели с результатами измерений как минимум двух разных АД.

Отсюда вытекает необходимость создания нескольких физических моделей на основе маломощных АД с разным числом пар полюсов.

Так как для получения диагностической информации предполагается использовать спектральный анализ сигналов, то требуется соответствующий инструмент, способный обеспечить высокую точность и корректность результатов.

Выпускаемые промышленностью современные анализаторы спектра способны с высокой точностью определять амплитуды и частоты, гармонических составляющих сигнала. Однако для такой узкоспециализированной задачи определения амплитуд и частот гармоник, характерных для повреждения узлов электродвигателя, существующие анализаторы плохо подходят, так как стоят очень дорого и требуют доработки программного обеспечения, что не всегда возможно.

В настоящее время для диагностирования асинхронных двигателей традиционно используется спектральный анализ, основанный на быстром преобразовании Фурье (БПФ) или оконном преобразовании Фурье (ОПФ). Метод быстрого преобразования Фурье малоприменим для этих целей, что в первую

очередь обусловлено таким явлением, как эффект растекания спектра. Из-за явления растекания спектра мощные гармонические составляющие (например, основная гармоника сети) "размазываются" по всему спектру, в результате чего амплитуды других гармоник могут быть определены ошибочно. Для того чтобы избежать подобного эффекта, необходимо увеличивать время записи сигнала, которое может достигать до нескольких минут для низкочастотных составляющих спектра (для корректного определения низкочастотных составляющих). За это время может произойти изменение нагрузки, смещение датчика и ряд других явлений, приводящих к потере точности измерения.

ОПФ позволяет с довольно высокой точностью определять частоты и амплитуды гармонических составляющих даже при малом времени записи сигнала. Достигается это путём подавления боковых лепестков гармоник с большой амплитудой, что значительно уменьшает влияние эффекта растекания спектра на гармоники с малыми амплитудами. Однако при использовании ОПФ значительно увеличивается ширина основного лепестка гармоник, что приводит к неправильному определению гармонических составляющих с малыми амплитудами, находящимися вблизи высокоамплитудных гармоник при малом времени записи сигнала.

В связи с этим некоторые авторы разрабатывают специальные анализаторы спектра для контроля состояния различных узлов асинхронных двигателей [85–88]. Однако все эти анализаторы, в настоящее время находятся на стадии исследования (разработки) и не имеют практического применения.

Таким образом, для спектрального анализа ВМП АД потребовался специализированный скалярный анализатор спектра, позволяющий с высокой точностью определять амплитуды и частоты любых гармонических составляющих сигнала, не требующий при этом большого времени записи сигнала.

***Примечание. В дальнейшем под термином анализатор спектра будет пониматься скалярный анализатор спектра, то есть анализатор спектра, предназначенный для определения амплитуд и частот гармонических составляющих сигнала.***

## Выводы по главе 1

1. Проблема обрывов стержней характерна, для АД, работающих с тяжелыми условиями пуска и наиболее актуальна на пылеугольных электрических станциях. Повреждениям ОР подвержены двигатели механизмов топливоприготовления (дробилки, мельницы) и тягодутьевого тракта (дутьевые вентиляторы и дымососы). Обрыв стержней ОР способен вызвать отказ электропривода механизма собственных нужд, что может привести как к снижению вырабатываемой мощности, так и к полному останову энергоблока.

2. При эксплуатации АД с поврежденной ОР возрастают потребляемая мощность и вибрация, что сказывается на продолжительности работы подшипников и тепловом режиме работы двигателя. При длительной эксплуатации АД даже с одним оборванным стержнем в ОР годовые потери, вызванные перерасходом электроэнергии, могут превышать стоимость самого двигателя.

3. Повреждения короткозамкнутой ОР развиваются довольно медленно, поэтому выявление данного типа неисправностей наиболее целесообразно на раннем этапе их развития, причем диагностирование должно проводиться на работающем двигателе, не прерывая при этом технологический процесс.

4. Для поиска диагностических признаков неисправностей АД наиболее эффективным средством является спектральный анализ сигналов с применением ЭВМ. Применение ЭВМ позволяет в значительной степени упростить и автоматизировать процесс спектрального анализа, что особенно важно для практической реализации методов диагностирования.

5. Исследованиями радиальной составляющей ВМП, направленным на разработку методов диагностирования узлов АД, в частности ОР, пока уделяется мало внимания, поэтому исследования в данном направлении представляют научный и практический интерес.

## **ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

### **2.1. Постановка задачи**

Основой любого надежного метода диагностирования АД является понимание влияния неисправностей на электрические, магнитные или механические параметры машины. Компьютерное моделирование является эффективным и недорогим способом изучения влияния различных повреждений на характеристики АД. Математическое моделирование способно предоставить виртуальные данные измерений, которые с помощью современных методов обработки сигналов могут быть преобразованы в соответствующую форму (диагностический сигнал), позволяющую выявить неисправность.

Важно отметить тот факт, что если система контроля будет не в состоянии обнаружить искусственную неисправность по виртуальным диагностическим сигналам, то вряд ли она будет корректно работать с реальными АД.

Таким образом, для разработки метода контроля состояния ОР АД по ВМП, в данной главе ставится цель произвести компьютерное моделирование ВМП АД с исправной и поврежденной обмоткой ротора и решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние обрывов стержней ОР на спектр ВМП;
2. Исследовать влияние эксплуатационных факторов на спектр ВМП АД для определения наиболее надежного диагностического параметра обрыва стержней ОР;
3. Доказать отсутствие влияния сигналов от соседних электродвигателей на сигнал радиальной составляющей ВМП объекта исследования.

## 2.2. Компьютерное моделирование внешнего магнитного поля асинхронного двигателя

В настоящее время метод конечных элементов является основным численным методом, применяемым для моделирования распределения физического поля. Как правило, метод конечных элементов находит решение любой технической задачи, которая может быть описана конечным набором пространственных уравнений частной производной с определенными граничными и начальными условиями.

Одной из ведущих компаний, предлагающих эффективные программные средства для моделирования различных процессов с помощью метода конечных элементов, является Ansys. Поэтому для компьютерного моделирования ВМП был выбран хорошо зарекомендовавший себя программный комплекс Ansys Maxwell, который обладает широкими возможностями по автоматизации создания моделей электрических машин.

Для моделирования были выбраны два АД с различным числом пар полюсов, параметры которых представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Параметры тестовых АД

Параметр	АД №1	АД №2
Тип двигателя	ЗВР71-2	АИР 71А6
Число пар полюсов	1	3
Номинальная мощность, Вт	250	370
Напряжение, В	380	380
Номинальный ток, А	0,56	1,4
Номинальная частота вращения, об/мин	2880	900
КПД, %	–	65
Коэффициент мощности, о.е.	0,83	0,63
Число пазов статора	24	36
Число стержней обмотки ротора	19	33

Также необходимо отметить, что на базе выбранных двигателей созданы экспериментальные стенды, о которых будет рассказано в главе 4. Это позволит в дальнейшем сделать вывод о корректности результатов моделирования, полученных с помощью Ansys Maxwell, и целесообразности дальнейшего применения этого программного комплекса.

На начальном этапе моделирование АД осуществлялось с помощью специального расчетного модуля Ansys RMxprt, который использует классическую аналитическую теорию электрических машин и метод эквивалентной магнитной цепи для вычисления рабочих характеристик машин с учётом таких эффектов, как нелинейность электротехнической стали, несинусоидальность магнитного потока в зазоре и вытеснение тока в массивных проводниках. Исходные данные, необходимые для создания моделей АД в программном комплексе Ansys Maxwell, представлены в Прил. 1. С помощью инструмента RMxprt были рассчитаны основные рабочие характеристики АД, которые представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Расчетные параметры АД

<b>Параметр</b>	<b>АД №1</b>	<b>АД №2</b>
<b>Тип двигателя</b>	ЗВР71-2	АИР 71А6
<b>Мощность, Вт</b>	250	370
<b>Фазный ток статора в номинальном режиме, А</b>	0,567	1,38
<b>Частота вращения в номинальном режиме, об/мин</b>	2881,1	945,6
<b>КПД, %</b>	82,4	64,7
<b>Коэффициент мощности в номинальном режиме, о.е.</b>	0,8	0,623

Полученные расчетные характеристики АД оказались весьма близки к номинальным параметрам, представленным в табл. 2.1. Единственным параметром, который существенно отличался от номинального значения, оказалась частота вращения АД №2. Однако впоследствии оказалось, что это не было ошибкой, так как полученное значение частоты вращения оказалось близко к реальному (см. Прил. 2).

После подтверждения соответствия расчетных характеристик АД их номинальным значениям, с помощью инструмента RМхprt было выполнено создание конечноэлементных моделей, в основе которых лежит численное решение дифференциальных уравнений Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями методом конечных элементов [97, 98, 109]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \\ \nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \cdot D = \rho, \\ \nabla \cdot B = 0, \\ \nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \\ D = \varepsilon \cdot E, \\ B = \mu \cdot H, \\ J = \sigma \cdot E, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где  $H$  – напряженность электрического поля;  $J$  – плотность тока;  $D$  – электрическая индукция;  $E$  – напряжённость электрического поля;  $B$  – магнитная индукция;  $\rho$  – объёмная плотность стороннего электрического заряда,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\sigma$  – удельная проводимость.

Помимо самих АД также были смоделированы реальные датчики. В воздушном зазоре каждого АД размещен внутренний индуктивный датчик (ВИД), представляющий собой два витка провода, намотанных на зубец статора. Вблизи корпуса АД размещена точка, имитирующая датчик Холла (ДХ), в которой регистрируется радиальная составляющая индукции магнитного поля. Обрыв стержня ОР моделировался путем удаления одного из стержней из геометрии модели. Геометрия модели АД №1 вместе с сеткой конечных элементов представлена на рис. 2.1, на рис 2.2 показано расположение датчиков.

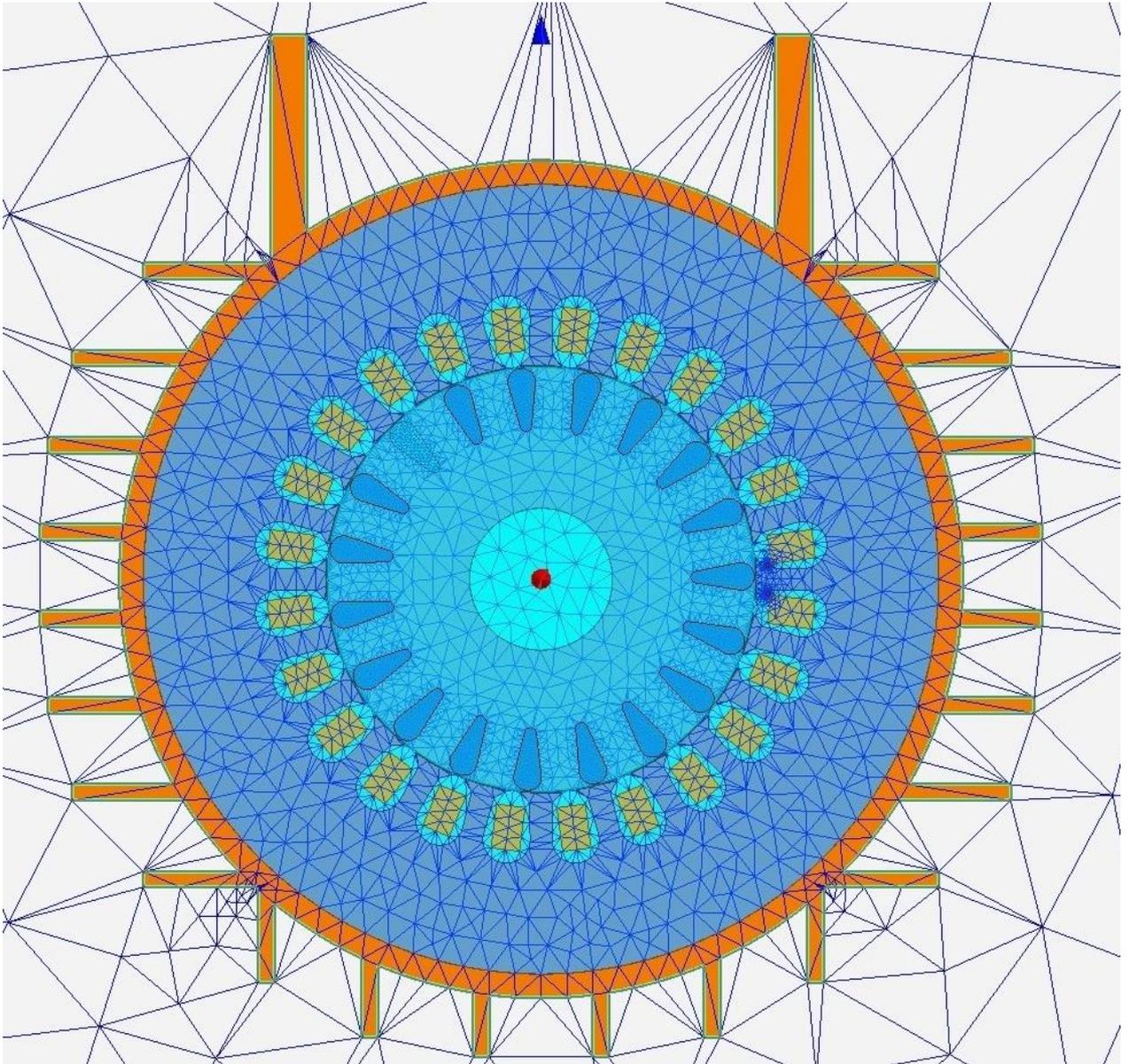


Рис. 2.1. Геометрия математической модели АД №1

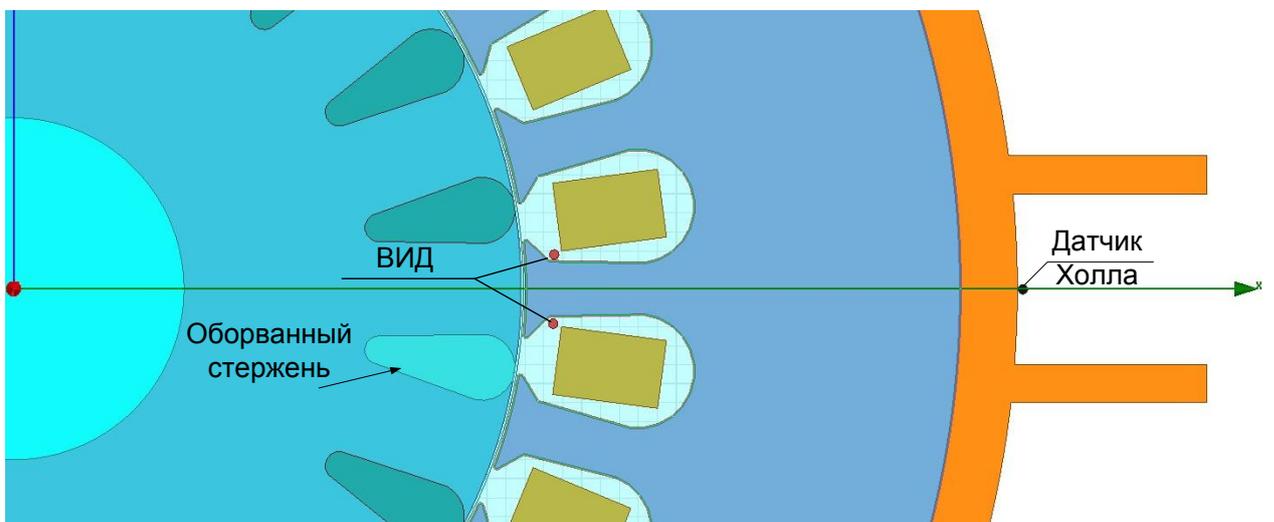


Рис 2.2. Расположение датчиков на модели АД №1

Модель АД №1 выполнена с оребрением корпуса, однако эксперименты показали, что оребрение, выполненное из немагнитных материалов (в данном случае это силумин), практически не влияет на результаты моделирования, поэтому при создании модели АД №2 в целях упрощения геометрии и уменьшения количества конечных элементов, корпус АД был сделан гладким.

Геометрия модели АД №2 вместе с сеткой конечных элементов представлена на рис. 2.3, расположение датчиков аналогично рис 2.2.

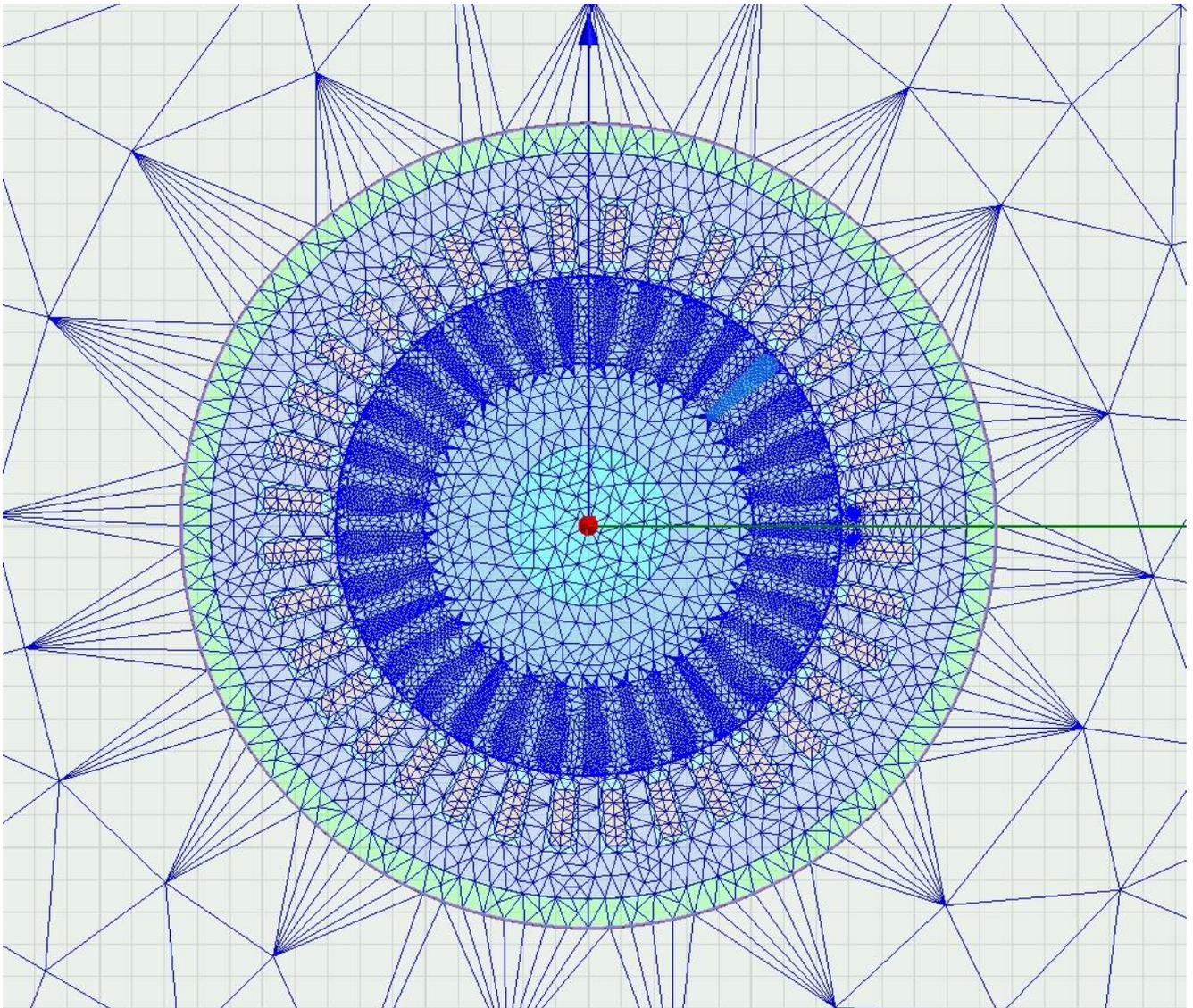


Рис. 2.3. Геометрия математической модели АД №2

Разработанные математические модели АД №1 и АД №2 позволяют моделировать процесс пуска машины и ее работу в установившемся режиме.

Исходными данными являются напряжение, приложенное к выводам обмотки статора в начальный момент пуска, момент сопротивления на валу ротора, геометрия АД и характеристики конструктивных материалов (корпуса, магнитопроводов статора и ротора, проводников обмоток статора и ротора, вала ротора).

В качестве граничного условия было принято, что на расстоянии 1 м от корпуса АД векторный магнитный потенциал равен нулю (как будет показано в главе 4, электромагнитные поля исследуемых АД невозможно зарегистрировать при удалении датчика поля от корпуса на расстояние более 40 см). При этом, согласно [97, 98, 109] связь векторного магнитного потенциала  $A$  с магнитной индукцией описывается как  $B = \nabla \times A$ .

Ввиду двухмерной постановки задачи скос пазов ротора не учитывается.

### **2.3. Анализ результатов компьютерного моделирования**

Согласно [5, 36, 89, 90], обрыв стержня клетки ротора вне зависимости от полюсности машины приводит к перераспределению тока по стержням. Новое распределение тока можно математически представить в виде суммы первоначального тока (при отсутствии обрыва стержня) и фиктивного (добавочного) тока от оборванного стержня, причем в оборванном стержне фиктивный ток равен и противоположен первоначальному, что обеспечивает равенство нулю тока в оборванном стержне. Из сказанного следует, что обмотку ротора с поврежденными стержнями можно представить двумя обмотками – одна из которой будет исправной, а другая – фиктивной (ФОР), в которой по оборванным стержням протекают фиктивные токи, которые далее замыкаются по исправным стержням. Фиктивные токи наводят в воздушном зазоре машины свое магнитное поле.

Частоты гармоник магнитного поля, вызванного фиктивными токами при любом числе оборванных стержней и расположении их по отношению друг к другу, описываются формулой (1.1)

$$f_{\Phi OP}^{(v\pm)} = f_c \cdot \left( \frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right)$$

Каждому порядку гармоник амплитудного спектра, генерируемого фиктивными токами, принадлежат две гармоники, одна из которых имеет нижнюю боковую частоту  $f_{\Phi OP}^{(v-)}$ , а другая – верхнюю боковую частоту  $f_{\Phi OP}^{(v+)}$ , значения которых отличаются на величину  $\Delta f^{(v)} = 2 \cdot f_c \cdot s$ .

*В целях упрощения приняты следующее обозначение гармоник –  $\Phi OPv\pm$ , где  $\Phi OPv-$  будет обозначать гармонику  $\Phi OP$   $v$ -ого порядка на нижней боковой частоте  $f_{\Phi OP}^{(v-)}$ , а  $\Phi OPv+$  – на верхней боковой частоте  $f_{\Phi OP}^{(v+)}$  соответственно.*

Для подтверждения корректности работы модели произведем анализ виртуальных сигналов, полученных с датчика ВИД, и сравним их с результатами, полученными из известных литературных источников [4, 5, 34].

Анализ виртуальных данных измерений, полученных в ходе компьютерного моделирования, будет производиться с помощью разработанного анализатора спектра, принципы работы которого представлены в главе 3.

На рис 2.4, 2.5 показаны формы сигналов, полученных с датчиков ВИД АД №1 и АД №2 соответственно при номинальной нагрузке на валу ротора.

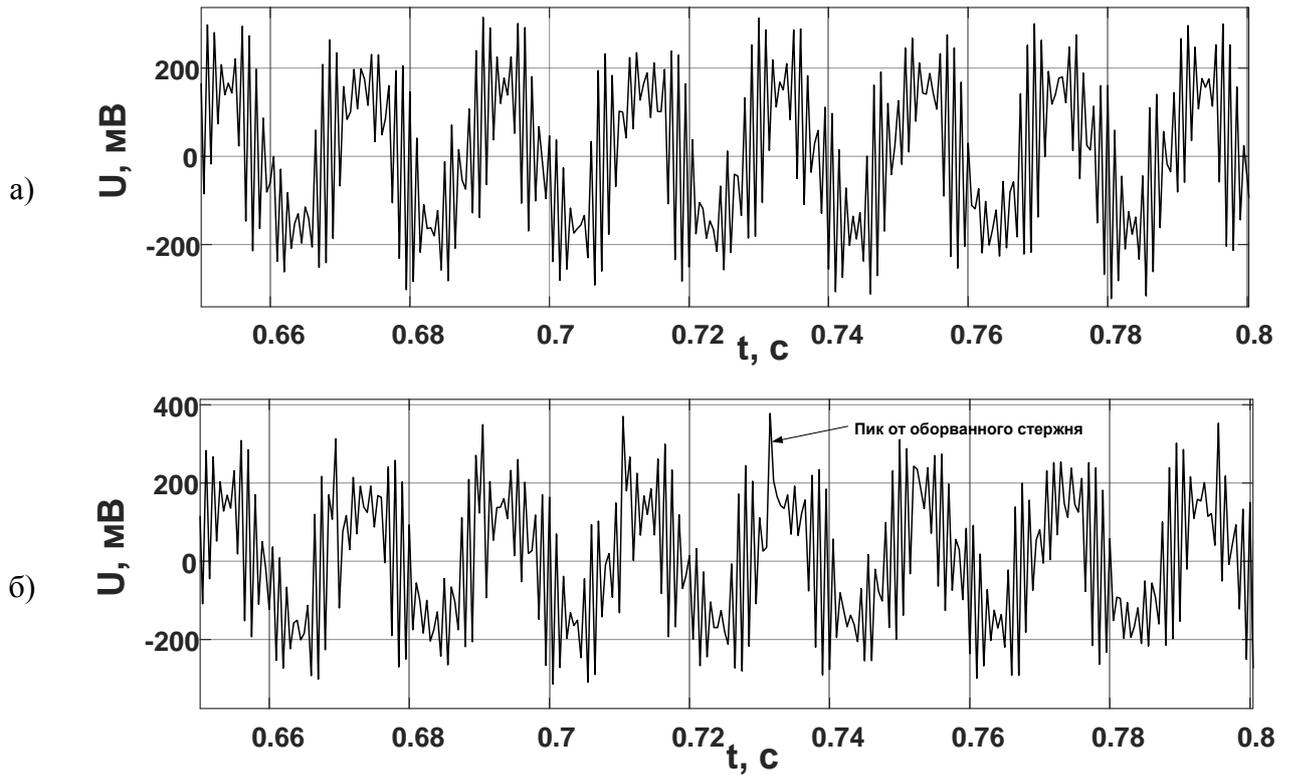


Рис. 2.4. Форма сигнала с датчика ВИД АД №1 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем

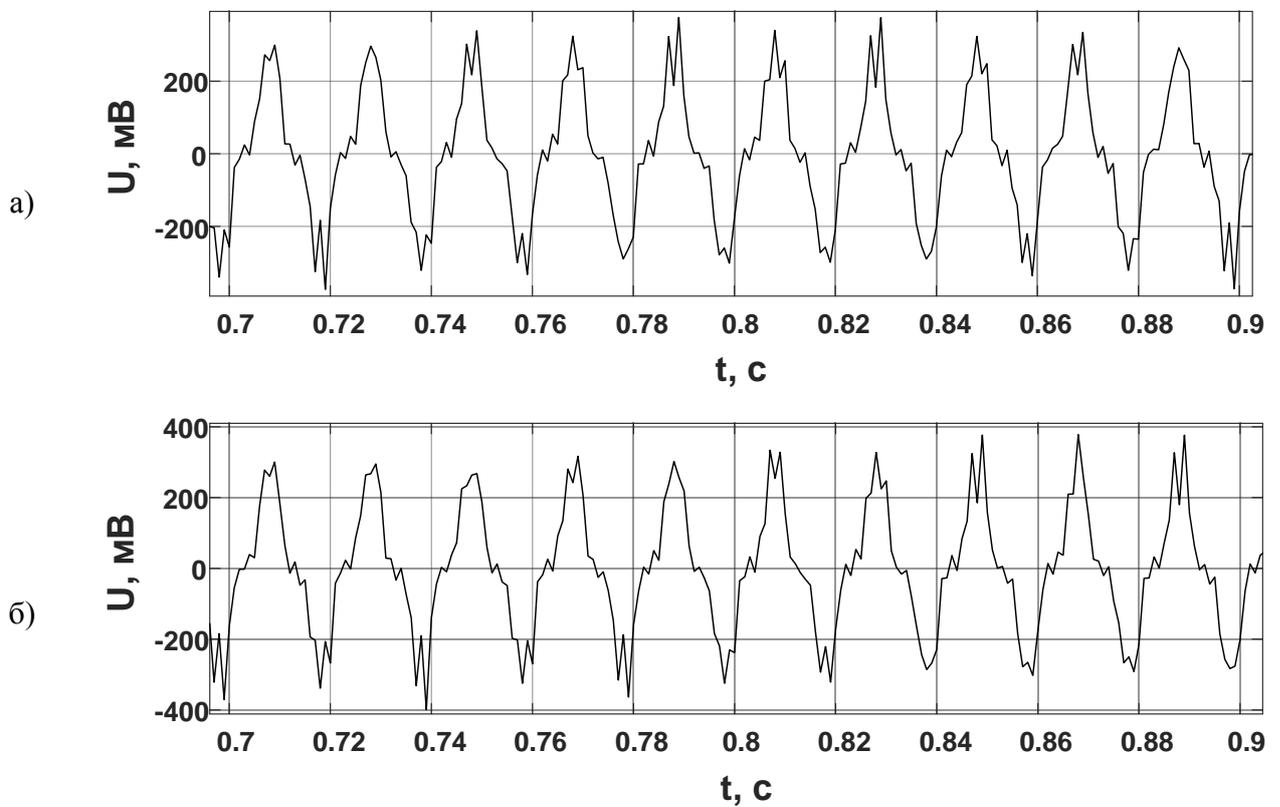


Рис. 2.5. Форма сигнала с датчика ВИД АД №2 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем

С помощью спектрального анализа полученных сигналов произведено исследование воздействия обрыва стержней ОР АД на спектр магнитного поля воздушного зазора.

На рис 2.6, 2.7 показаны спектры сигналов, полученных с датчиков ВИД АД №1 и АД №2 соответственно при номинальной нагрузке. В табл. 2.3–2.6 представлены амплитуды гармоник на частотах, соответствующих частотам гармоник ФОР. При этом  $U_{иор}$  – амплитуды гармоник для исправной обмотки ротора (ИОР), а  $U_{пор}$  – амплитуды гармоник для поврежденной обмотки ротора (ИОР).

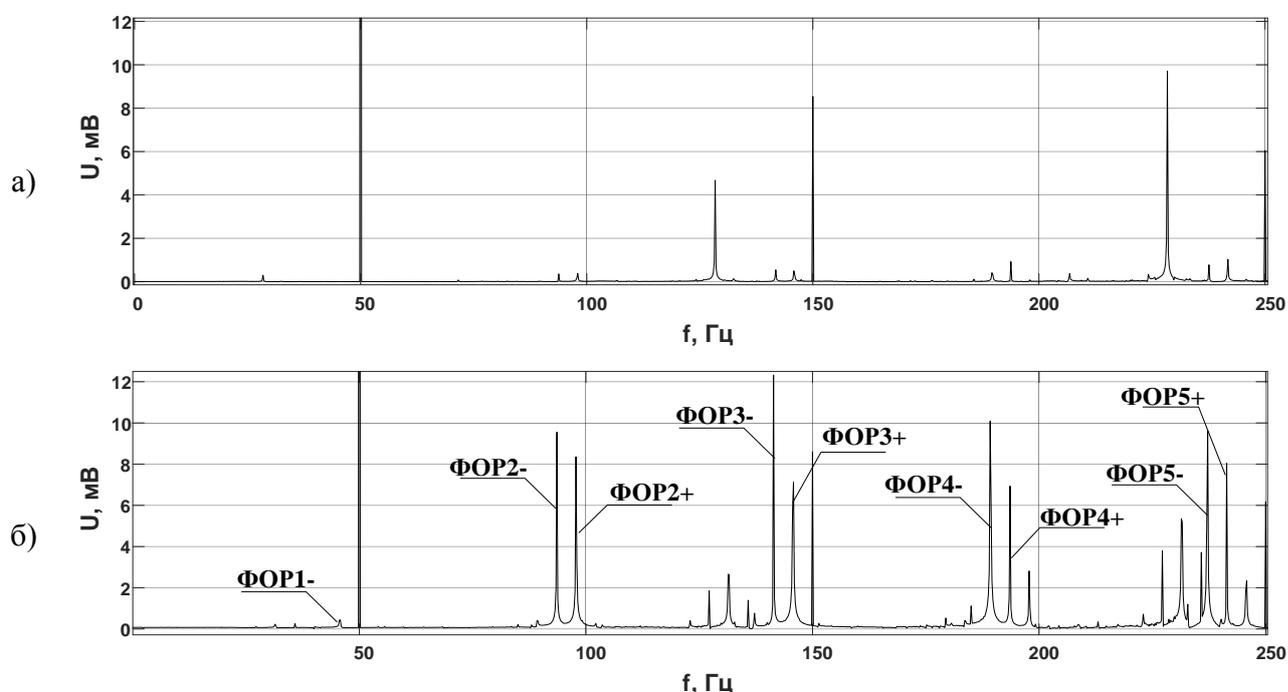


Рис. 2.6. Спектр сигнала с датчика ВИД АД №1 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем

Таблица 2.3. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu$ -, полученные с датчика ВИД АД №1

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-
Частота, Гц	Гц	45,70	93,57	141,42	189,28	237,13	285,00	332,83	380,69
$U_{иор}$	мВ	0,01	0,46	0,61	0,59	0,79	1,02	1,10	0,53
$U_{пор}$	мВ	3,06	10,02	12,64	12,92	11,88	12,56	12,42	10,30
$U_{пор}/U_{иор}$	о.е.	216,53	21,70	20,63	21,77	15,01	12,29	11,32	19,60

Таблица 2.4. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu+$ , полученные с датчика ВИД АД №1

Порядок гармоники ФОР		1+/ $f_c$	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Частота, Гц	Гц	50,00	97,85	145,71	193,56	241,42	289,27	337,13	384,99
U <sub>иор</sub>	мВ	161,55	0,44	0,68	0,95	1,13	0,97	1,22	1,43
U <sub>пор</sub>	мВ	161,38	9,36	10,02	7,25	8,21	9,22	7,90	10,01
U <sub>пор</sub> /U <sub>иор</sub>	о.е.	1,00	21,22	14,80	7,66	7,25	9,48	6,46	6,99

Примечание: 1+/ $f_c$  означает, что частота гармоники  $\Phi OP1+$  совпадает с частотой сети.

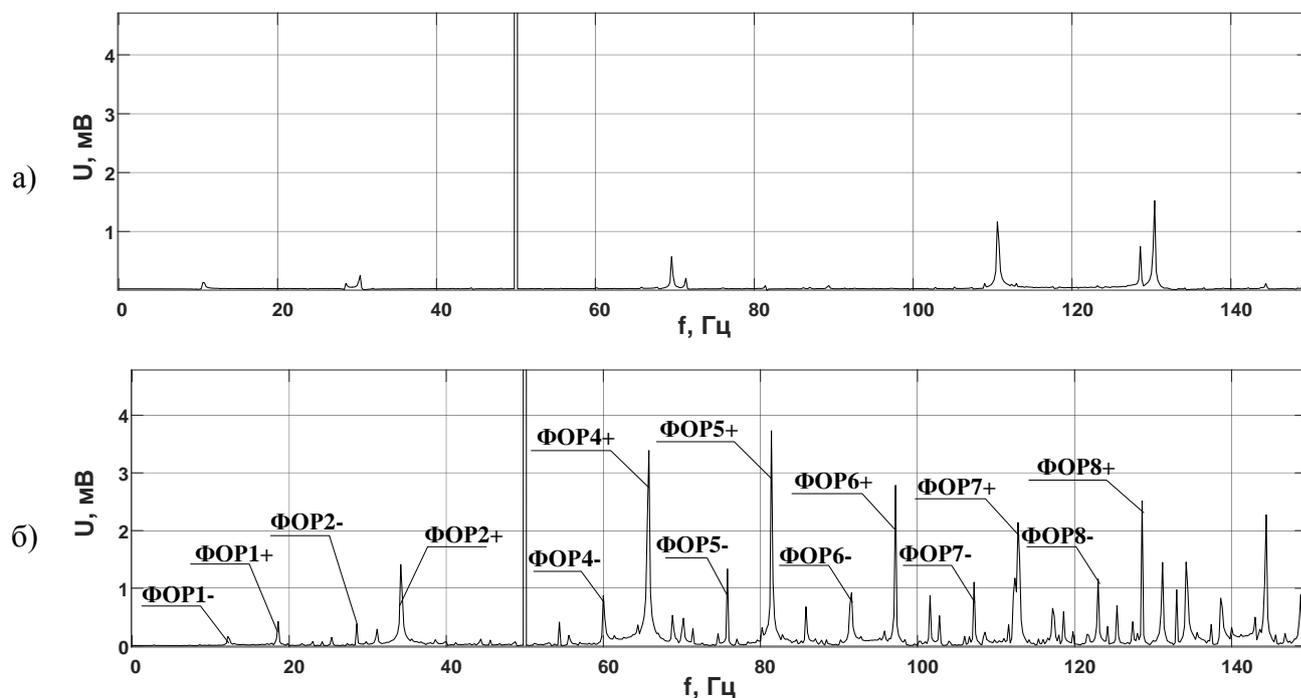


Рис. 2.7. Спектр сигнала с датчика ВИД АД №2 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем

Таблица 2.5. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu-$ , полученные с датчика ВИД АД №2

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-
Частота, Гц	Гц	12,20	28,60	44,40	60,00	75,80	91,60	107,20	123,00
U <sub>иор</sub>	мВ	0,03	0,12	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,08
U <sub>пор</sub>	мВ	0,16	0,38	0,12	0,87	1,33	0,92	1,10	1,16
U <sub>пор</sub> /U <sub>иор</sub>	о.е.	4,67	3,18	2,79	19,86	33,49	25,18	23,15	14,64

Таблица 2.6. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu+$ , полученные с датчика ВИД АД №2

Порядок гармоники $\Phi OP$		1+	2+	3+/f <sub>c</sub>	4+	5+	6+	7+	8+
Частота, Гц	Гц	18,60	34,20	50,00	65,80	81,40	97,20	112,80	128,60
U <sub>иор</sub>	мВ	0,03	0,03	224,19	0,06	0,08	0,04	0,12	0,75
U <sub>пор</sub>	мВ	0,42	1,41	224,16	3,39	3,73	2,79	2,14	2,52
U <sub>пор/иор</sub>	о.е.	12,30	53,56	1,00	61,34	46,12	76,41	18,15	3,37

**Примечание:** 3+/f<sub>c</sub> означает, что частота гармоники  $\Phi OP3+$  совпадает с частотой сети.

Проанализируем полученные результаты. Из рис. 2.6, 2.7 и табл. 2.3–2.6 видно, что обрыв стержня обмотки ротора действительно существенно влияет на магнитное поле воздушного зазора АД, что выражается в существенном увеличении амплитуд определенных гармонических составляющих сигнала. Например, значительный рост продемонстрировали гармоники, частоты которых совпадают с частотами гармоник  $\Phi OP$ , определяемых выражением (1.1), при этом относительное увеличение амплитуд может составлять 10 и более раз. Полученные результаты согласуются с данными, полученными из открытых источников [4, 5, 34] и результатами экспериментов (см. Прил. 3). Таким образом, можно сделать вывод, что обнаруженные гармоники действительно являются гармониками  $\Phi OP$ , а компьютерное моделирование магнитного поля воздушного зазора АД с поврежденной ОР с помощью Ansys Maxwell является корректным.

Убедившись в корректности моделирования магнитного поля воздушного зазора АД, теперь можно перейти к исследованию ВМП вблизи корпуса АД. Для этого будут использоваться виртуальные сигналы радиальной составляющей магнитной индукции, полученные с модели ДХ, установленного вблизи (0,1 мм) корпуса АД.

На рис. 2.8, 2.9 представлена картина распределения магнитной индукции снаружи корпуса для АД №1 и №2 соответственно, которая показывает, что магнитное поле действительно проходит наружу АД в радиальном направлении. На рис. 2.8 видно пространственное магнитное поле с одной парой полюсов, а на рис. 2.9 – с тремя парами полюсов, что соответствует параметрам АД.

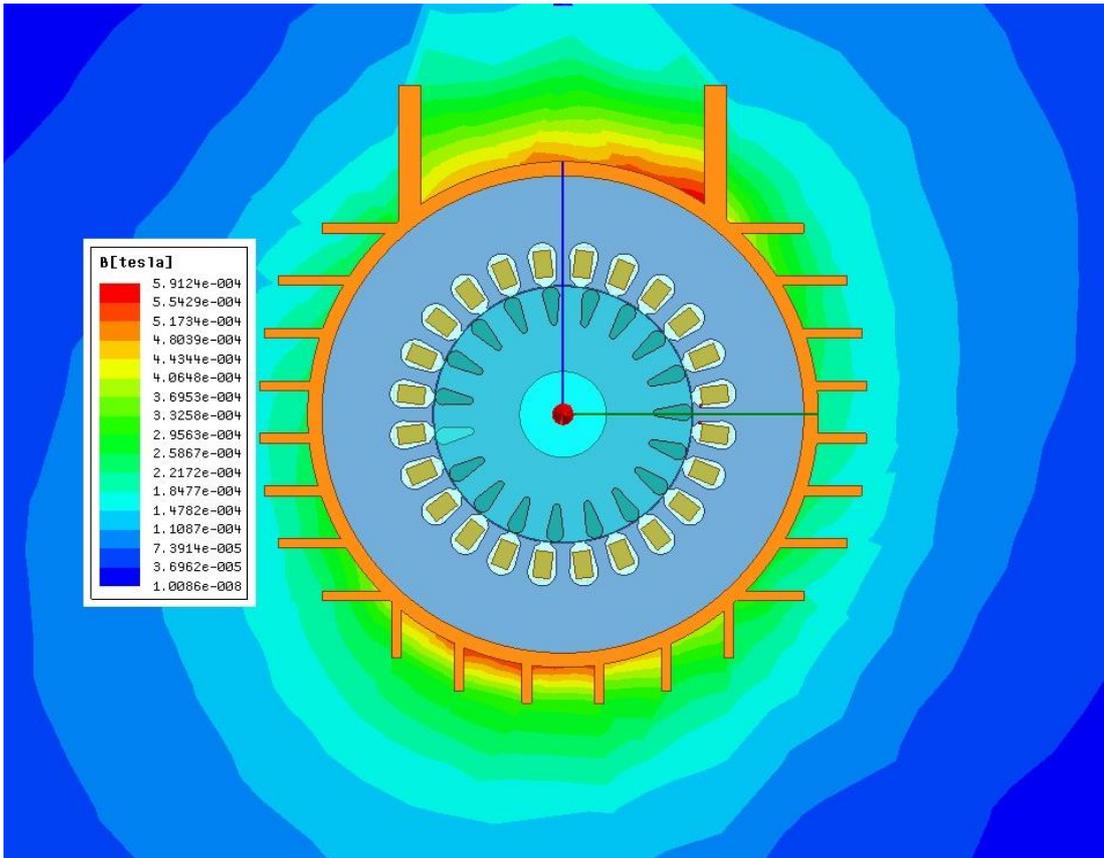


Рис. 2.8. Распределение магнитного поля снаружи АД №1

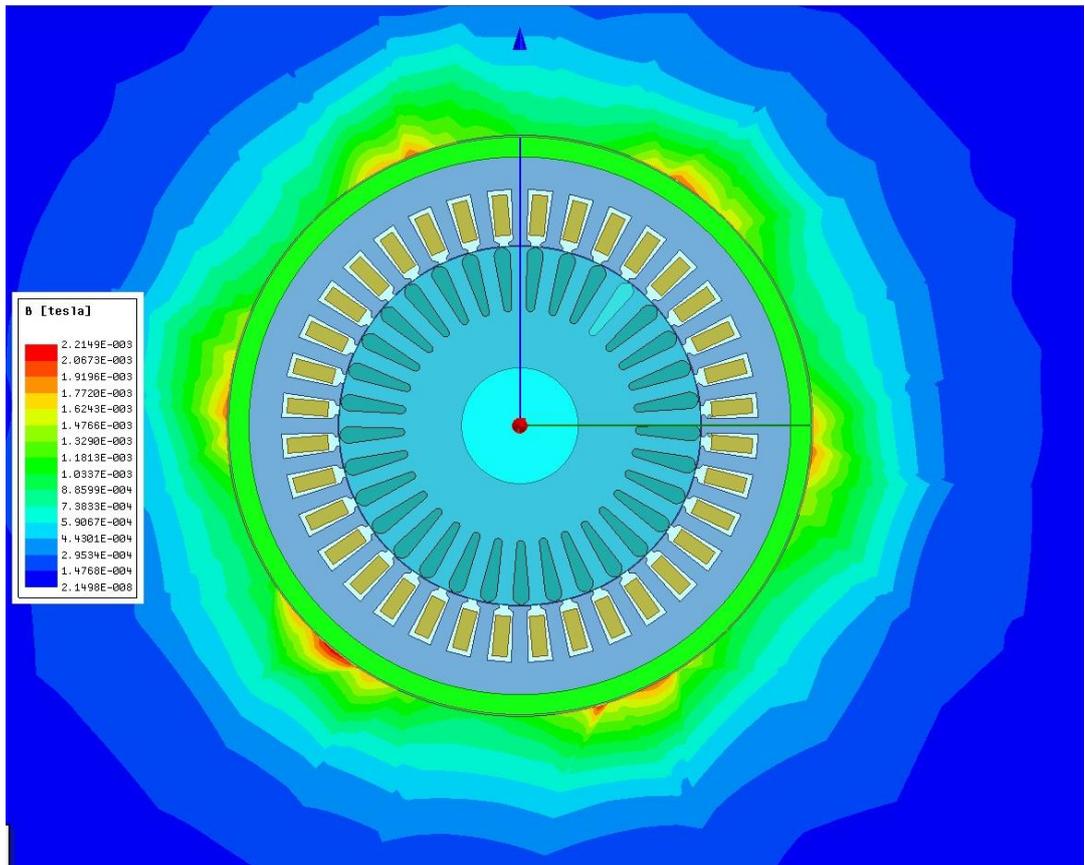


Рис. 2.9. Распределение магнитного поля снаружи АД №2

На корпусе АД величина магнитной индукции может достигать нескольких мТл, однако при удалении от АД магнитное поле быстро затухает. Особенности изменения магнитного поля при удалении от корпуса АД будут рассмотрены позднее.

На рис. 2.10, рис. 2.12 показаны формы виртуальных сигналов, полученных с ДХ, установленного вблизи корпуса АД №1 и №2 соответственно. Как можно заметить, обрыв стержня ОР (см. рис. 2.10, б, 2.12, б) практически никак не повлиял на их форму.

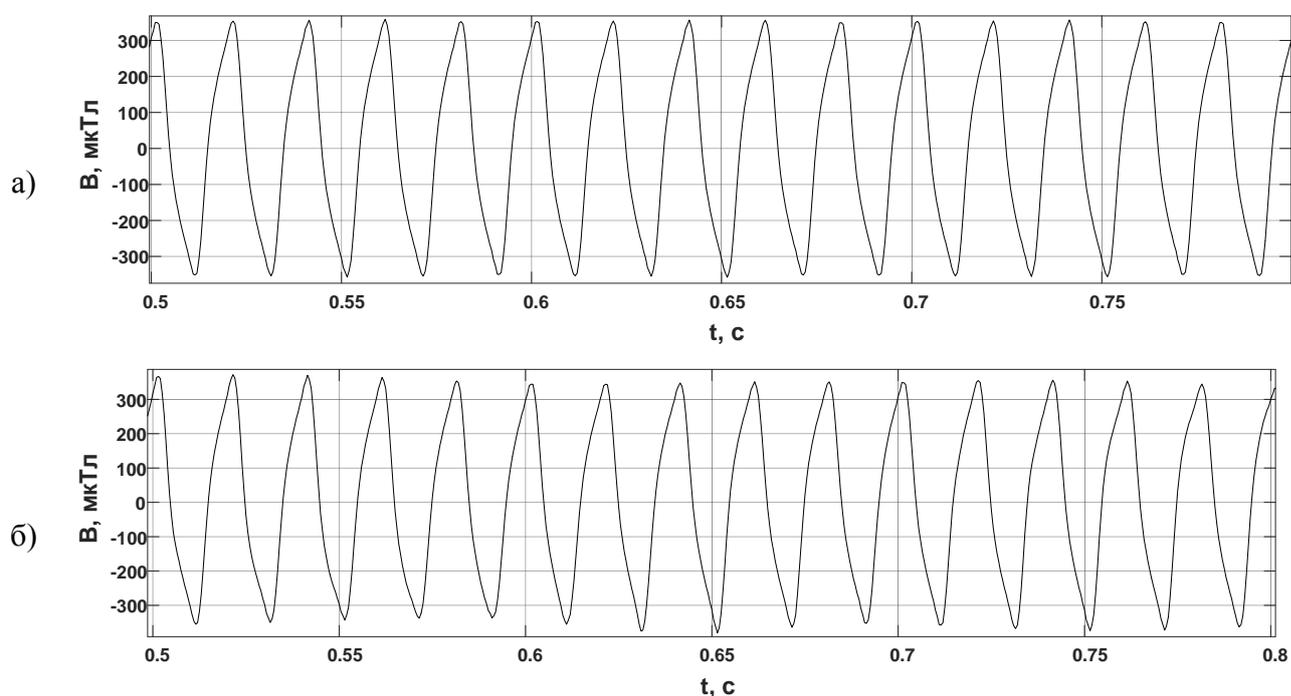


Рис. 2.10. Форма сигнала с датчика Холла АД №1 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем

В табл. 2.7–2.10 представлены значения амплитуд гармоник указанных выше сигналов на частотах, соответствующих частотам гармоник ФОР. При этом  $B_{иор}$  – амплитуды гармоник для исправной обмотки ротора (ИОР), а  $B_{пор}$  – амплитуды гармоник для поврежденной обмотки ротора (ПОР).

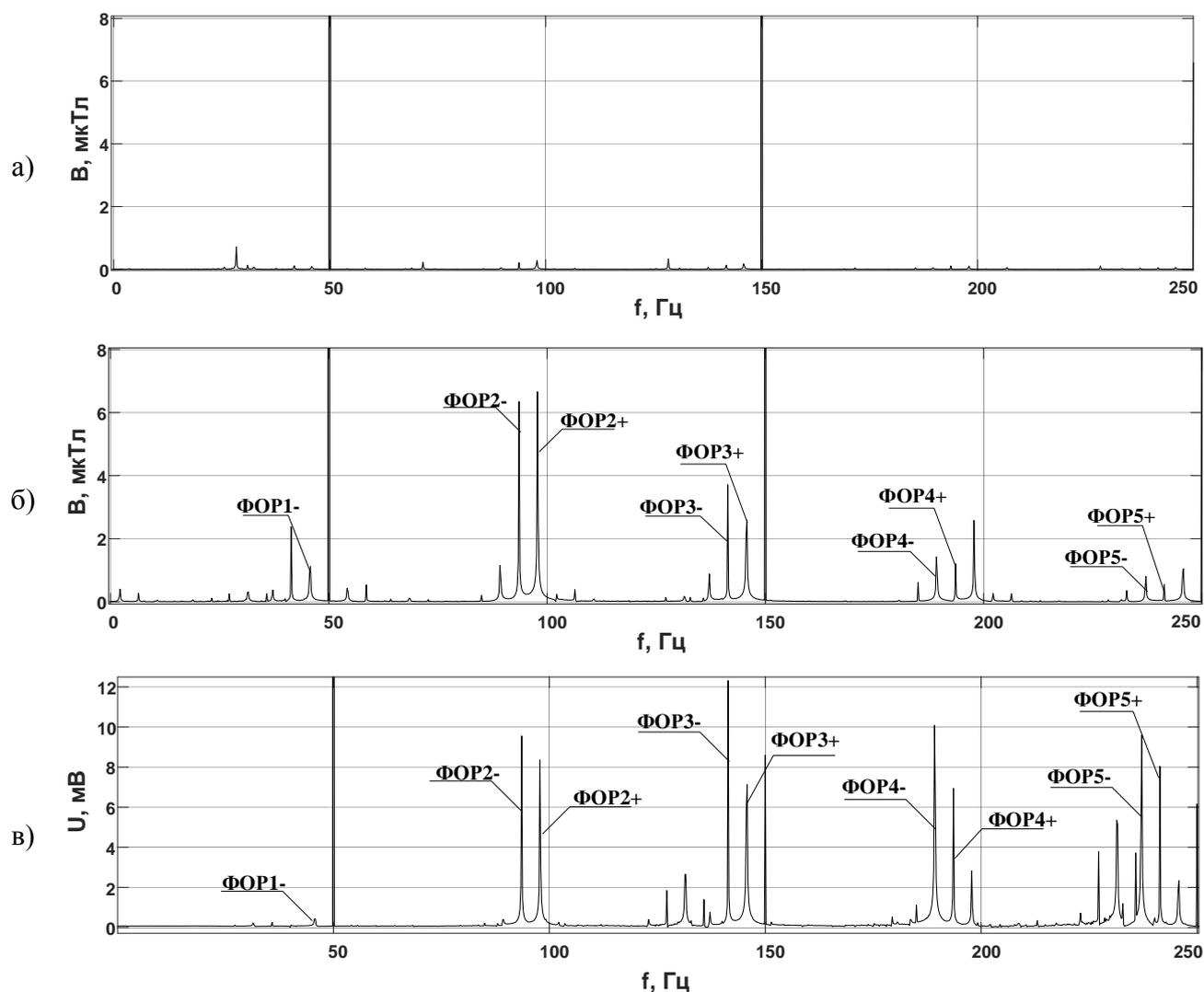


Рис. 2.11. Спектры сигналов АД №1 при номинальной нагрузке:

а – датчик Холла, исправная обмотка ротора; б – датчик Холла, обмотка ротора с одним оборванным стержнем; в – датчик ВИД, обмотка ротора с одним оборванным стержнем

Таблица 2.7. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu$ -, полученные с датчика Холла АД №1

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-
Частота, Гц	Гц	45,98	93,81	141,71	189,60	237,62	285,57	333,50	381,38
Виор	мкТл	1,11	0,52	0,24	0,11	0,11	0,05	0,08	0,01
Впор	мкТл	5,15	6,76	3,60	1,91	0,99	0,54	0,28	0,10
Впор/ Виор	о.е.	4,65	12,97	15,30	17,15	8,87	10,00	3,54	7,07

Таблица 2.8. Амплитуды гармоник  $\Phi OPv+$ , полученные с датчика Холла АД №1

Порядок гармоники ФОР		1+/ $f_c$	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Частота, Гц	Гц	50,00	97,93	145,95	193,80	241,76	289,70	337,65	385,53
В <sub>иор</sub>	мкТл	332,76	0,39	0,35	0,23	0,12	0,04	0,05	0,03
В <sub>пор</sub>	мкТл	333,36	7,64	3,89	1,34	0,51	0,20	0,20	0,19
В <sub>пор</sub> /В <sub>иор</sub>	о.е.	1,00	19,79	10,99	5,82	4,30	5,03	3,63	6,75

На рис. 2.11, а, б и рис. 2.13, а, б представлены спектры сигналов, полученных с ДХ АД №1 и №2 с ИОР и при обрыве одного стержня ОР соответственно, в сравнении со спектрами сигнала с датчика ВИД АД №1 и №2 при обрыве одного стержня ОР (рис. 2.11, в и рис. 2.13, в) при номинальной нагрузке.

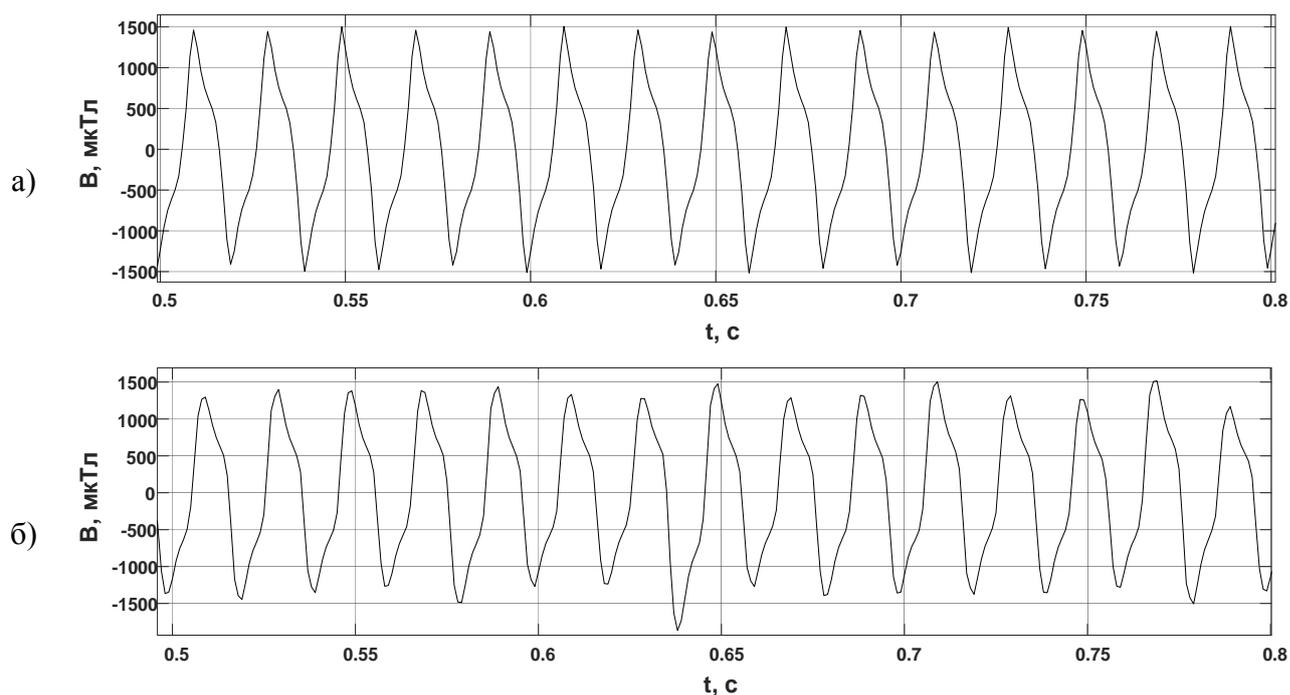


Рис. 2.12. Формы сигналов с датчика Холла АД №2 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем

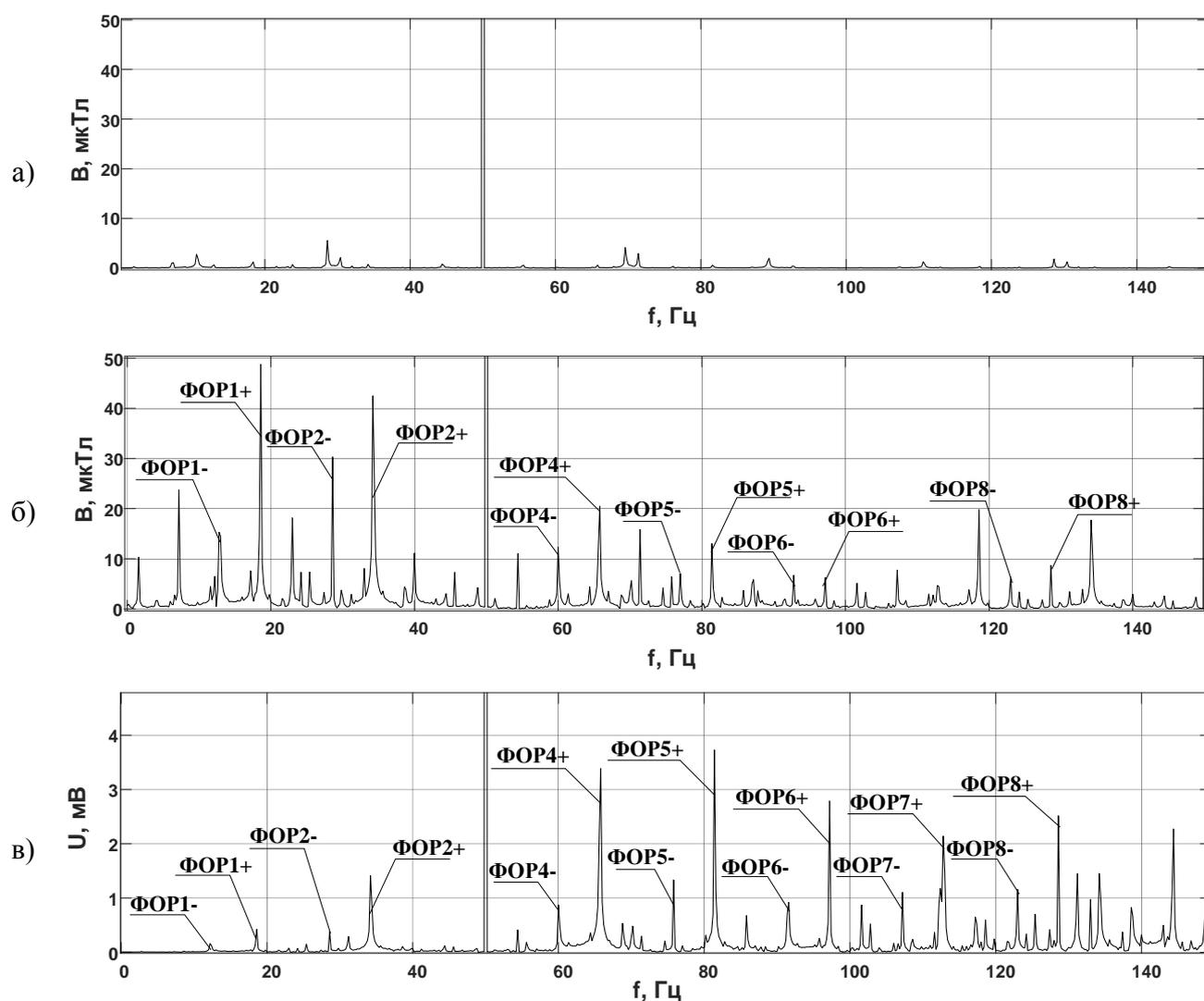


Рис. 2.13. Спектры сигналов АД №2 при номинальной нагрузке:

а – датчик Холла, исправная обмотка ротора; б – датчик Холла, обмотка ротора с одним оборванным стержнем; в – датчик ВИД, обмотка ротора с одним оборванным стержнем

Таблица 2.9. Амплитуды гармоник  $\Phi OP_n$ -, полученные с датчика Холла АД №2

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-
Частота, Гц	Гц	12,88	28,65	44,57	60,24	76,13	92,82	107,39	123,82
Виор	мкТл	1,38	7,93	2,72	0,23	0,80	1,05	1,25	0,78
Впор	мкТл	24,73	31,59	3,89	15,44	6,39	2,87	8,36	7,20
Впор/ Виор	о.е.	17,91	3,99	1,43	67,97	8,04	2,72	6,66	9,20

Таблица 2.10. Амплитуды гармоник  $\Phi OPv+$ , полученные с датчика Холла АД №2

Порядок гармоники ФОР		1+	2+	3+/ $f_c$	4+	5+	6+	7+	8+
Частота, Гц	Гц	18,41	34,28	50,00	65,73	81,64	98,05	112,86	128,64
Виор	мкТл	2,02	1,54	945,85	0,68	0,78	1,29	0,49	2,62
Впор	мкТл	52,98	58,00	1010,49	26,35	14,58	7,16	7,29	9,12
Впор/Виор	о.е.	26,18	37,68	1,07	38,60	18,73	5,55	14,95	3,47

Как видно из рис. 2.11, *a, б* и рис. 2.13, *a, б* обрыв стержня обмотки ротора существенно влияет на спектр ВМП АД. В целом, прослеживаются те же изменения, что и в сигналах с датчиков ВИД (см. рис 2.6, 2.7). Обрыв стержня ОР привел к существенному увеличению амплитуд гармонических составляющих с частотой, которая совпадает с частотами гармоник ФОР, определяемых выражением (1.1). Таким образом, математическое моделирование показывает, что гармоники ФОР присутствуют в радиальной составляющей индукции ВМП АД, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных в главе 4.

Исходя из результатов, представленных в табл. 2.7–2.10, видно, что обрыв одного стержня приводит к увеличению отдельных амплитуд гармоник ФОР в 10 и более раз. Свойство увеличения амплитуд данных гармоник может быть использовано в качестве диагностического признака обрыва стержней ОР АД.

Из результатов исследований, приведенных в [5], следует, что величина амплитуды какой-то одной конкретной гармоники ФОР зависит от числа и места расположения оборванных стержней в ОР. Поэтому в некоторых случаях ее величина при наличии поврежденных стержней может быть близка к 0.

Ввиду вышесказанного, с точки зрения обеспечения достоверности результатов контроля, полагаться на измерение какой-то одной гармоники нерационально, поэтому целесообразно подобрать такой диагностический параметр обрыва стержней обмотки ротора, который учитывал бы амплитуды сразу нескольких гармоник ФОР.

В качестве такого диагностического параметра предлагается интегральный показатель – средняя мощность сигнала индукции ВМП, которая может быть определена по равенству Парсеваля [91] по выражению:

$$P_{\text{ФОР}} = \frac{1}{2} \left( \sum_{v=1}^n B_{v-}^2 + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq p}}^n B_{v+}^2 \right), \quad (2.2)$$

где  $B_{v-}$ ,  $B_{v+}$  – амплитуды гармоник ФОР  $v$ -го порядка на нижней ( $v-$ ) и верхней ( $v+$ ) боковой частотах;  $n$  – предельный порядок учитываемых гармоник.

Данная величина позволит оценивать состояние ОР не путём сравнения амплитуды каждой гармонической составляющей с граничными значениями, а путём сравнения значения всего одного параметра с граничным. При этом даже в случае возрастания отдельных гармонических составляющих значение средней мощности сигнала будет определяться совокупностью гармоник, что позволит оценивать состояние двигателя с более высокой достоверностью.

В связи с этим были проведены соответствующие эксперименты для определения влияния, оказываемого гармоническими составляющими более высокого порядка на значение средней мощности сигнала. Для этого по выражению (2.2) была определена средняя мощность сигнала при различных значениях  $n$ . При расчете были исключены гармоники ФОР, частоты которых равны частоте сети. Для АД №1 это  $\text{ФОР}1+$ , а для АД №2 –  $\text{ФОР}3+$ . Результаты представлены в табл. 2.11.

Результаты, представленные в табл. 2.11, показывают, что обрыв стержня ОР приводит к почти стократному увеличению средней мощности сигнала ФОР. В реальных АД это соотношение должно быть меньше из-за естественной несимметрии ОР, эксцентриситета ротора и иных факторов.

На основании представленных выше результатов можно сказать, что средняя мощность сигнала ФОР может быть использована в качестве диагностического параметра для определения повреждений ОР АД.

Таблица 2.11. Значения средней мощности сигнала ФОР, полученных с датчика Холла АД №1 и АД №2

Предельный порядок учитываемых гармоник, $n$	АД №1			АД №2		
	$P_{иор}$ ,	$P_{пор}$	$\frac{P_{пор}}{P_{иор}}$	$P_{иор}$ ,	$P_{пор}$	$\frac{P_{пор}}{P_{иор}}$
	мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.	мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
2	0,2	50,0	206,0	35,5	3889	109
3	0,4	63,3	167,4	39,2	3897	99
4	0,4	66,0	148,9	39,55	4363,70	110,34
5	0,5	66,6	147,5	40,17	4490,35	111,79
6	0,5	66,8	145,8	41,56	4520,12	108,77
7	0,5	66,8	145,5	42,46	4581,63	107,90
8	0,5	66,9	145,3	46,22	4649,16	100,60
10	0,5	66,9	143,6	49,33	4676,08	94,79
15	0,5	66,9	142,1	51,10	4688,74	91,76

Необходимо отметить, что в спектрах сигналов, полученных с ДХ, по сравнению со спектрами, полученных с датчиков ВИД (рис. 2.11, в и рис. 2.13, в), гораздо лучше заметны низкочастотные составляющие спектра, особенно это заметно для АД №2, поэтому при разработке метода контроля предпочтение следует отдавать гармоникам ФОР низших порядков, так как они меньше всего затухают. Это подтверждают и результаты, представленные в табл. 2.11, которые показывают, что гармоники высоких порядков практически не оказывают влияния на величину средней мощности, что особенно явно выражено для АД №1 с одной парой полюсов, поэтому для определения средней мощности сигнала ФОР будет вполне достаточно ограничиться гармониками пятого порядка.

## **2.4. Исследование влияния эксплуатационных факторов на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя**

В ходе эксплуатации АД практически никогда не работает в идеальных условиях, однако при анализе литературных источников было установлено, что влияние эксплуатационных факторов на результаты контроля ОР АД практически не исследовалось. Под эксплуатационными факторами понимается отклонение эксплуатационных параметров АД в допустимых, или близких к ним, пределах.

В качестве наиболее вероятных эксплуатационных факторов, которые потенциально могут повлиять на результаты контроля ОР АД по ВМП, можно выделить следующие:

1. несимметрия питающего напряжения;
2. изменение нагрузки на валу ротора;
3. эксцентриситет ротора.

Для оценки влияния вышеуказанных факторов на ВМП АД и, соответственно, на возможные результаты контроля АД, было произведено компьютерное моделирование, результаты которого представлены далее.

### **2.4.1. Исследование влияния несимметрии напряжения на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя**

Согласно [94] основными показателями качества электроэнергии, характеризующими несимметрию напряжения, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности. Нормально допустимая величина данных коэффициентов равна 2%, а предельно допустимая – 4%. Исходя из этого, для последующего моделирования была принята предельная величина отклонения напряжения равная 10 В, при этом, в целях упрощения, напряжение

изменялось только в одной из фаз, а в двух других фазах напряжение было одинаковым и составляло 220 В.

Рассматривались следующие режимы:

1. одинаковое напряжение 220 В во всех трех фазах;
2. напряжение в фазе А 210 В;
3. напряжение в фазе А 215 В;
4. напряжение в фазе А 225 В;
5. напряжение в фазе А 230 В.

В табл. 2.12, 2.13 представлены амплитуды гармоник  $\Phi OP_{v-}$  и  $\Phi OP_{v+}$ , полученные с ДХ АД №1, а в табл. 2.14, 2.15 – АД №2, при отклонении напряжения одной из фаз и номинальной нагрузке на валу ротора.

На рис. 2.14–2.17 и рис. 2.18–2.21 представлены графики относительного (относительно напряжения 220 В) изменения амплитуд гармоник ФОР при несимметрии напряжения на АД №1 и №2 соответственно.

Также отдельно для гармоник  $\Phi OP_{v-}$  и гармоник  $\Phi OP_{v+}$  по следующему выражению определялись средние мощности  $P_{\Phi OP-}$  и  $P_{\Phi OP+}$ :

$$P_{\Phi OP_{\pm}} = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^5 B_{v_{\pm}}^2. \quad (2.3)$$

При расчете  $P_{\Phi OP+}$  исключалась гармоника с частотой, равной частоте сети, для АД №1 это  $\Phi OP1+$ , а для АД №2 это  $\Phi OP3+$ .

Таблица 2.12. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  АД №1, полученные с датчика Холла, при отклонении напряжения одной из фаз

Порядок гармоники ФОР			1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
<b>Исправная обмотка ротора</b>								мкТл <sup>2</sup>
1	220В	В, мкТл	0,14	0,61	0,35	0,15	0,1	0,3
2	210В	В, мкТл	0,1	0,5	0,28	0,09	0,09	0,2
3	215В	В, мкТл	0,11	0,21	0,15	0,08	0,16	0,2
4	225В	В, мкТл	0,11	0,25	0,15	0,23	0,07	0,2
5	230В	В, мкТл	0,19	0,21	0,16	0,24	0,05	0,2
<b>Один оборванный стержень</b>								
1	220В	В, мкТл	1,36	6,65	3,74	1,84	0,97	32,2
2	210В	В, мкТл	1	7,03	4,38	2,02	0,99	37,5
3	215В	В, мкТл	1,76	6,45	4,14	1,91	1,09	34,3
4	225В	В, мкТл	1,8	6,68	3,66	1,99	1,03	33,8
5	230В	В, мкТл	1,31	6,59	3,77	1,87	0,95	32,1

Таблица 2.13. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{\nu+}$  АД №1, полученные с датчика Холла, при отклонении напряжения одной из фаз

Порядок гармоники ФОР			1+/ $f_c$	2+	3+	4+	5+	РФОР+
<b>Исправная обмотка ротора</b>								мкТл <sup>2</sup>
1	220В	В, мкТл	334,27	0,33	0,39	0,34	0,09	0,2
2	210В	В, мкТл	320,51	0,37	0,30	0,26	0,06	0,2
3	215В	В, мкТл	326,09	0,32	0,22	0,17	0,06	0,1
4	225В	В, мкТл	340,59	0,31	0,50	0,11	0,06	0,2
5	230В	В, мкТл	351,73	0,26	0,44	0,10	0,09	0,1
<b>Один оборванный стержень</b>								
1	220В	В, мкТл	334,83	7,37	3,57	1,38	0,59	34,7
2	210В	В, мкТл	321,09	7,37	3,48	1,26	0,54	34,3
3	215В	В, мкТл	326,63	7,37	3,87	1,56	0,73	36,3
4	225В	В, мкТл	341,04	7,66	3,57	1,44	0,64	37,1
5	230В	В, мкТл	352,2	7,4	3,7	1,0	0,5	33,8

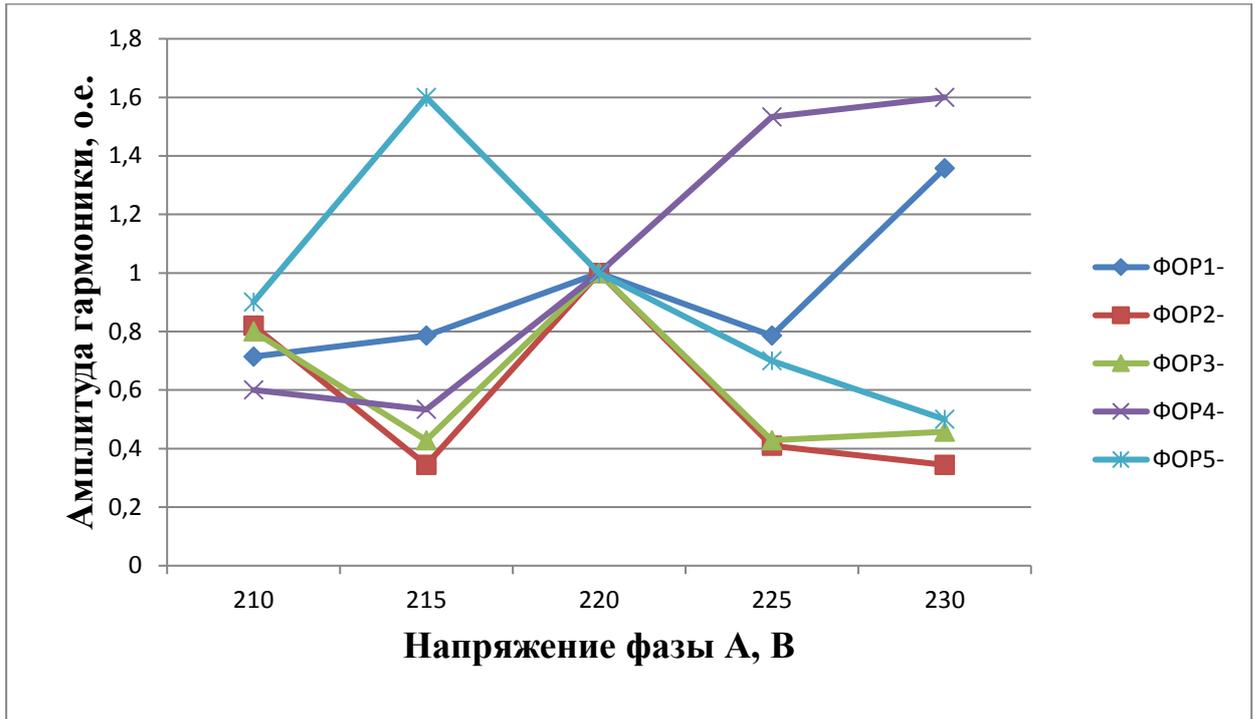


Рис. 2.14. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv-$  исправного АД №1, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

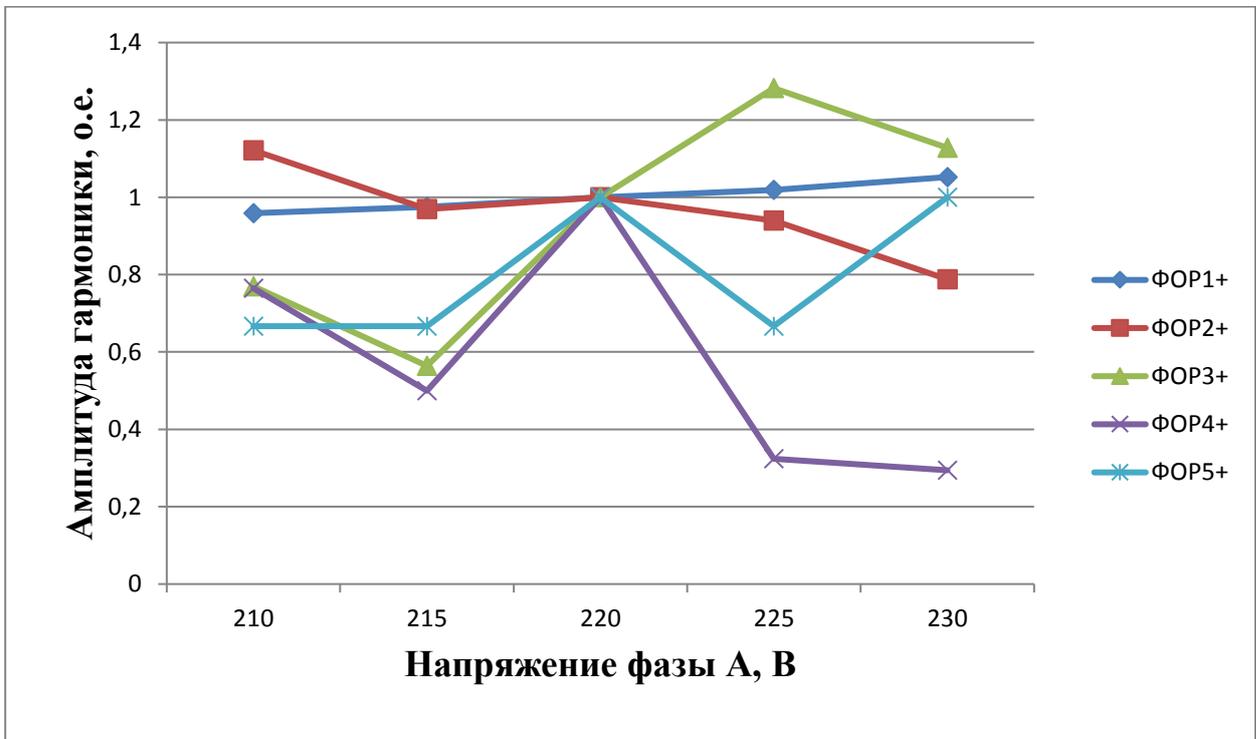


Рис. 2.15. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  исправного АД №1, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

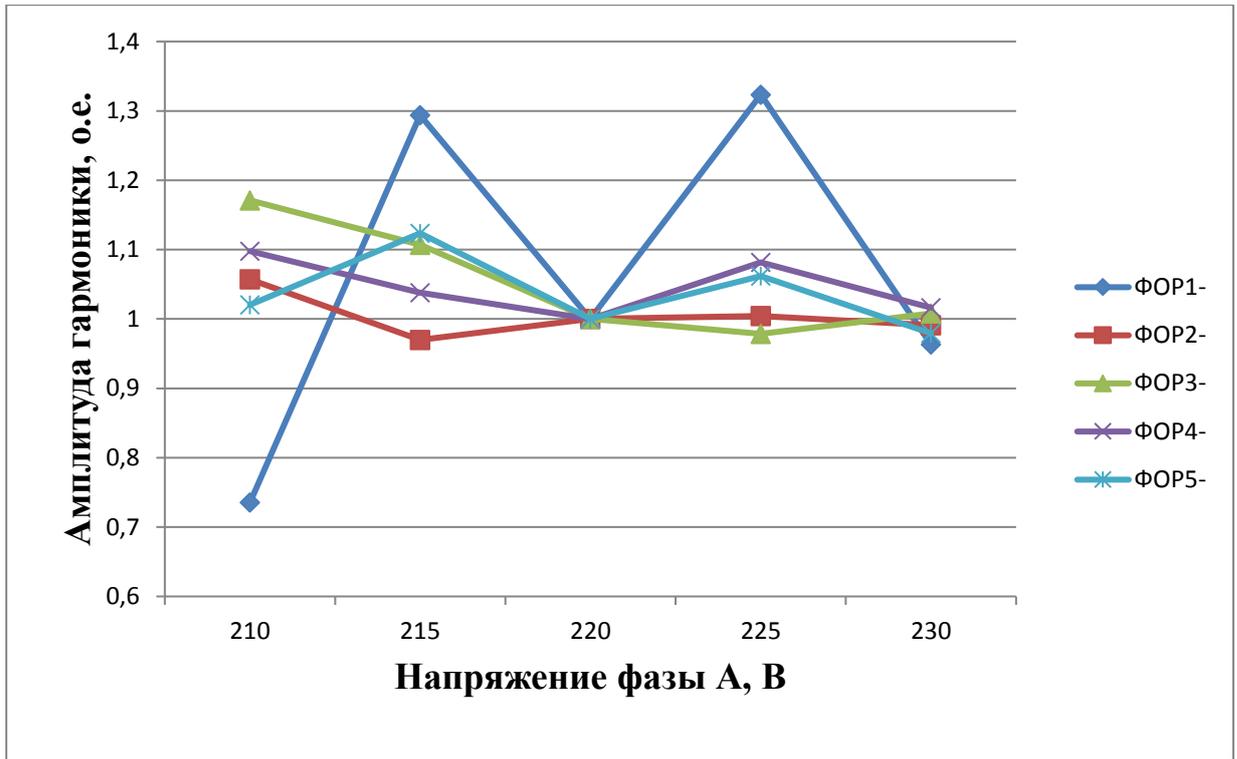


Рис. 2.16. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv-$  АД №1 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

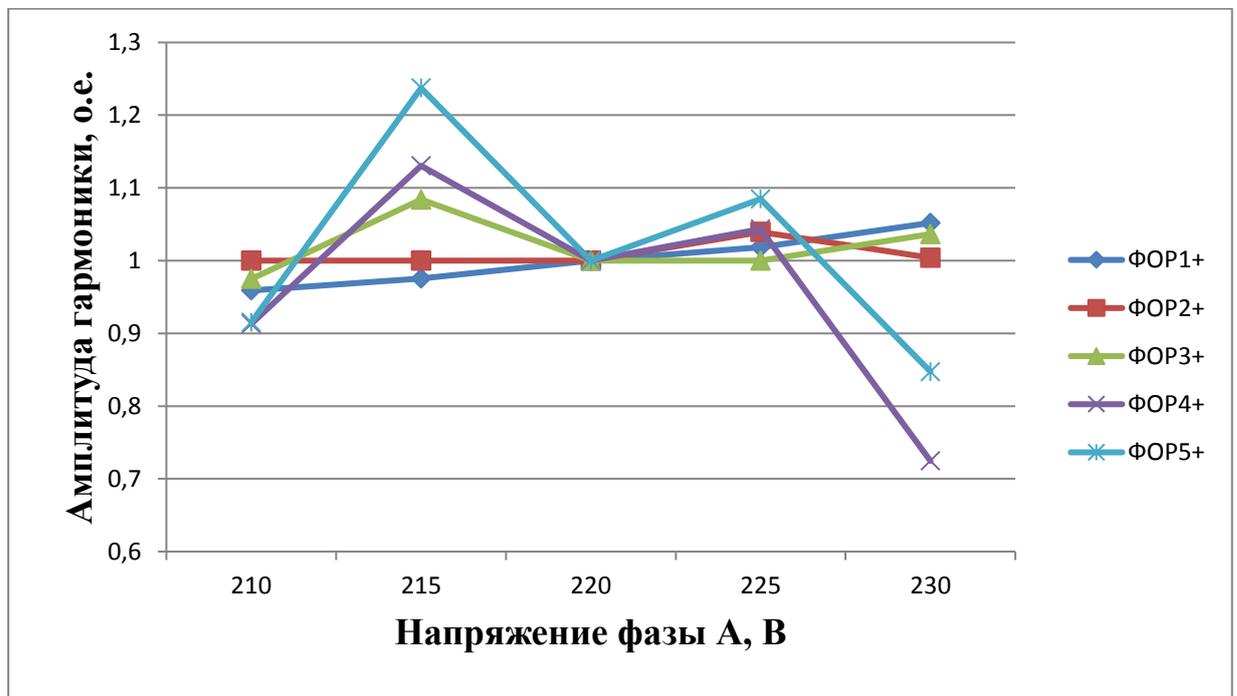


Рис. 2.17. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  АД №1 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

Таблица 2.14. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OPv$ - АД №2, полученные с датчика Холла, при отклонении напряжения одной из фаз

Порядок гармоники ФОР			1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
<b>Исправная обмотка ротора</b>								мкТл <sup>2</sup>
1	220В	В, мкТл	1,37	7,81	1,04	0,57	0,92	34,38
2	210В	В, мкТл	2,91	3,39	1,00	0,82	2,50	19,15
3	215В	В, мкТл	1,98	3,69	1,20	0,89	1,65	18,20
4	225В	В, мкТл	2,30	5,38	1,12	0,23	2,42	25,31
5	230В	В, мкТл	1,62	6,11	1,21	0,82	0,45	21,56
<b>Один оборванный стержень</b>								
1	220В	В, мкТл	24,73	31,59	3,99	15,44	6,39	951,68
2	210В	В, мкТл	24,44	30,07	4,46	14,67	6,21	891,40
3	215В	В, мкТл	23,39	28,48	4,82	14,76	5,52	819,22
4	225В	В, мкТл	22,16	29,00	4,25	15,45	7,26	824,49
5	230В	В, мкТл	23,43	32,41	4,62	15,27	5,79	933,69

Таблица 2.15. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OPv+$  АД №2, полученные с датчика Холла, при отклонении напряжения одной из фаз

Порядок гармоники ФОР			1+	2+	3+/f <sub>c</sub>	4+	5+	РФОР+
<b>Исправная обмотка ротора</b>								мкТл <sup>2</sup>
1	220В	В, мкТл	2,32	4,11	945,87	2,97	1,43	16,59
2	210В	В, мкТл	1,75	1,29	814,77	3,95	1,04	10,71
3	215В	В, мкТл	1,92	3,26	841,88	0,92	2,24	10,09
4	225В	В, мкТл	2,27	0,76	1002,76	3,08	2,78	11,47
5	230В	В, мкТл	2,04	0,99	1187,04	4,41	1,33	13,17
<b>Один оборванный стержень</b>								
1	220В	В, мкТл	52,98	58,00	1010,49	26,35	14,58	3538,67
2	210В	В, мкТл	49,00	50,12	837,61	27,20	13,91	2923,19
3	215В	В, мкТл	51,47	54,36	909,20	27,18	14,30	3273,34
4	225В	В, мкТл	52,06	57,05	1060,57	27,15	14,05	3449,46
5	230В	В, мкТл	57,8	61,56	1239,5	27,46	14,46	4046,76

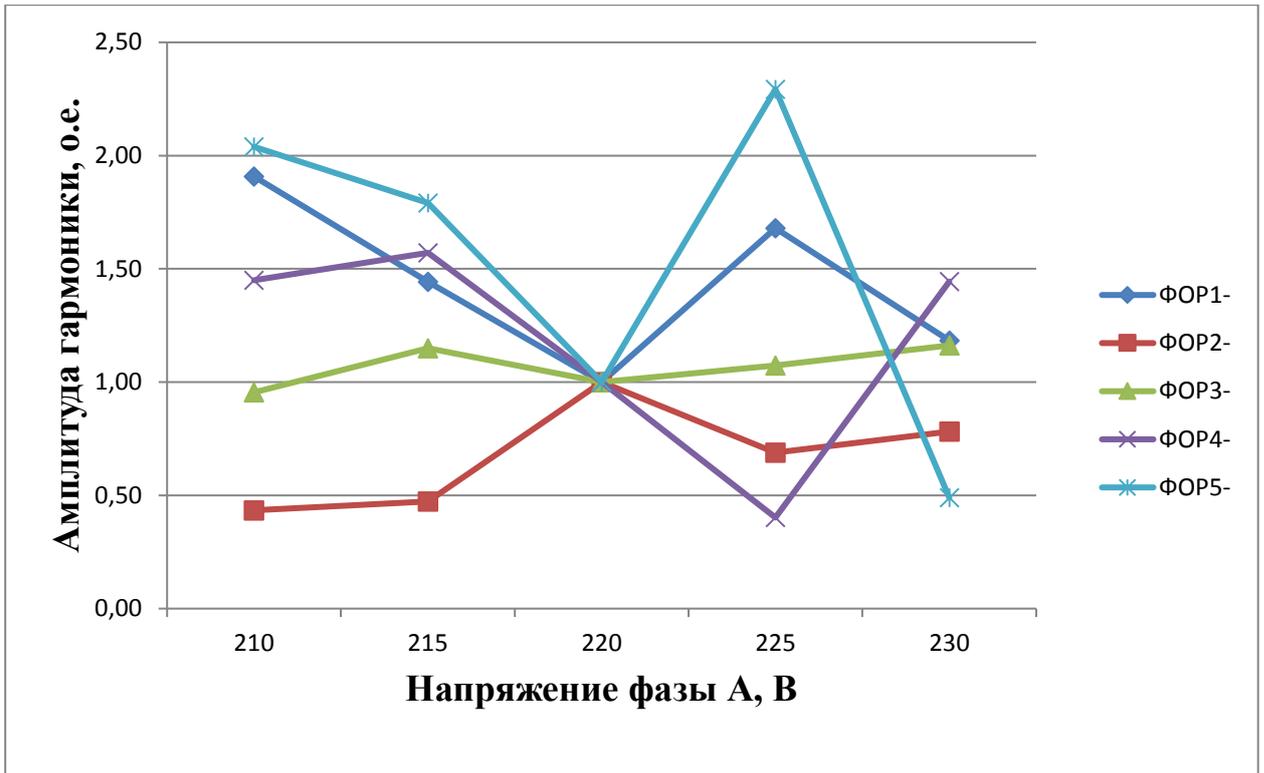


Рис. 2.18. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv-$  исправного АД №2, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

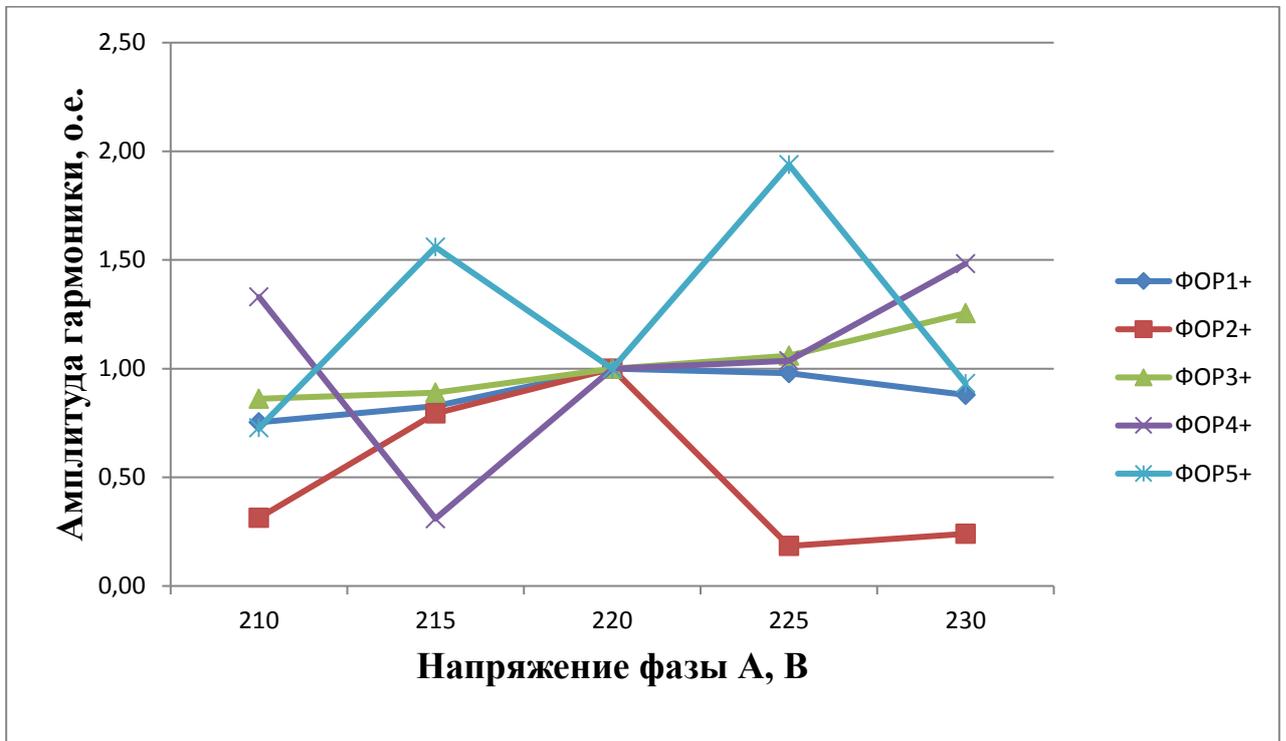


Рис. 2.19. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  исправного АД №2, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

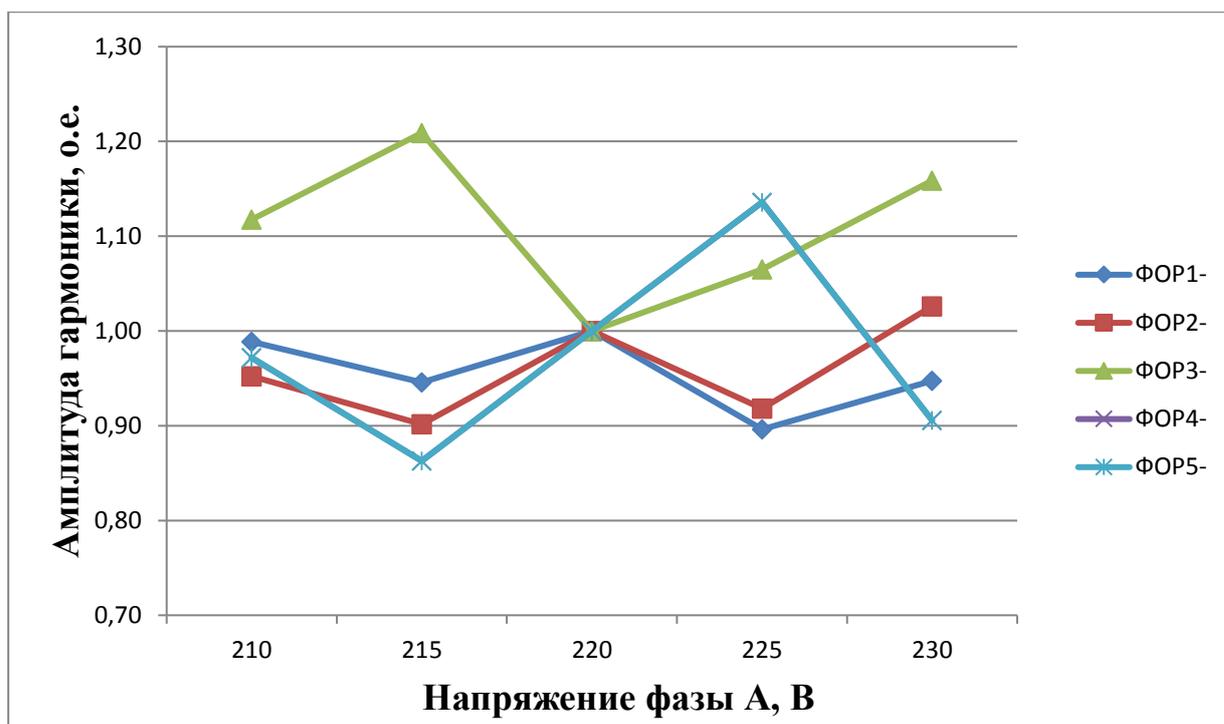


Рис. 2.20. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv-$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

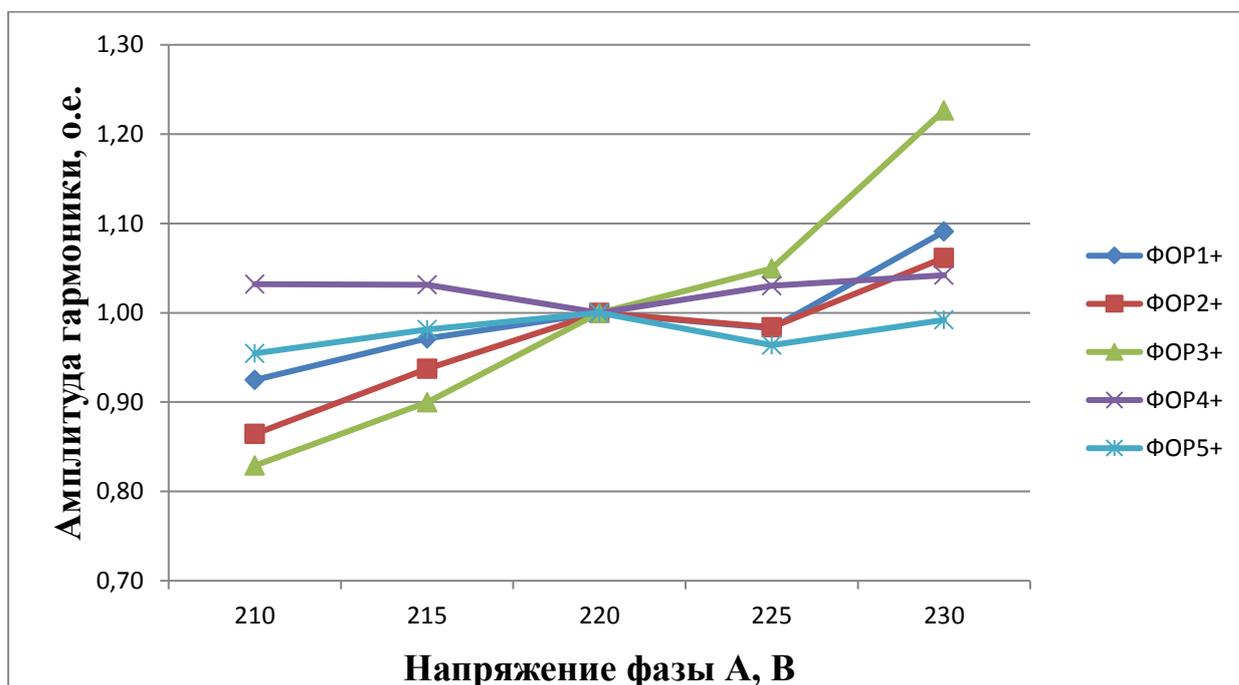


Рис. 2.21. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при несимметрии напряжения

Анализ полученных результатов показал, что несимметрия напряжений оказывает заметное влияние на гармоники ФОР лишь при исправной ОР.

Амплитуды гармоник ФОР демонстрируют хаотичное поведение, они могут как увеличиваться, так и уменьшаться, при этом амплитуды некоторых гармоник могут изменяться в 2 и более раза. Также необходимо отметить, что относительное изменение средней мощности гармоник ФОР не превышает 100%, что можно считать незначительным изменением, так как в случае обрыва стержня этот параметр изменяется в десятки раз.

В случае наложения несимметрии питающего напряжения на обрыв одного стержня максимальное относительное изменение амплитуд гармоник ФОР не превышает 30 %, величина средней мощности изменяется также не значительно.

Полученные результаты показывают, что несимметрия напряжения оказывает не существенное влияние на амплитуды гармоник ФОР ВМП АД и не приводит к серьёзному изменению средней мощности сигнала ФОР, поэтому в дальнейшем учитывать этот фактор не имеет смысла.

#### **2.4.2. Исследование влияния нагрузки на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя**

При изменении нагрузки на валу ротора будет изменяться и ток в роторе, что должно оказать существенное влияние на магнитное поле ротора и, соответственно, на гармоники ФОР.

В процессе компьютерного моделирования рассматривались режимы со следующими вариантами нагрузки на валу ротора:

1. нагрузка 120% от номинальной;
2. номинальная нагрузка;
3. нагрузка 80% от номинальной;
4. нагрузка 50% от номинальной;
5. нагрузка 30% от номинальной;
6. нагрузка 15% от номинальной.

В табл. 2.16, 2.17 представлены амплитуды и средняя мощность, гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  и  $\Phi OP_{\nu+}$ , при различной нагрузке на валу ротора АД №2. При этом  $P_{иор}$ ,

средняя мощность сигнала ФОР для ИОР, и  $P_{ПОР}$ , средняя мощность сигнала ФОР для ПОР, рассчитываются по выражению (2.3).

Таблица 2.16. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OPv$ - АД №2, полученные с датчика Холла, при различной нагрузке на валу ротора

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	$P_{ИОР}$	$P_{ПОР}$	$P_{ПОР} / P_{ИОР}$
							мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
<b>Нагрузка 120% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	1,93	2,93	1,32	0,24	0,21	7,08	1243,43	175,57
<b>ВпоР</b>	мкТл	24,79	34,87	16,43	17,91	8,10			
<b>ВпоР/ ВиОР</b>	о.е.	12,84	11,90	12,45	73,85	38,40			
<b>Номинальная нагрузка</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	1,38	7,93	1,04	0,57	0,92	34,38	951,68	28
<b>ВпоР</b>	мкТл	24,73	31,59	3,89	15,44	6,39			
<b>ВпоР/ ВиОР</b>	о.е.	17,91	3,99	1,43	67,97	8,04			
<b>Нагрузка 80% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	1,75	1,53	0,83	1,27	4,36	13,37	587,85	43,95
<b>ВпоР</b>	мкТл	16,33	27,15	3,65	11,86	4,24			
<b>ВпоР/ ВиОР</b>	о.е.	9,31	17,77	4,39	9,31	0,97			
<b>Нагрузка 50% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	2,78	0,45	0,74	0,28	5,26	18,08	312,51	17,29
<b>ВпоР</b>	мкТл	14,79	17,66	2,43	6,97	6,31			
<b>ВпоР/ ВиОР</b>	о.е.	5,33	39,07	3,27	25,11	1,20			
<b>Нагрузка 30% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	0,65	2,30	0,50	6,67	0,74	25,49	109,88	4,31
<b>ВпоР</b>	мкТл	4,91	12,13	2,12	5,15	4,20			
<b>ВпоР/ ВиОР</b>	о.е.	7,59	5,28	4,23	0,77	5,69			
<b>Нагрузка 15% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	2,45	2,03	0,31	1,36	5,67	22,1	42,2	1,9
<b>ВпоР</b>	мкТл	5,65	6,06	0,95	1,79	3,40			
<b>ВпоР/ ВиОР</b>	о.е.	2,31	2,98	3,06	1,32	0,60			

Таблица 2.17. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АД №2, полученные с датчика Холла, при различной нагрузке на валу ротора

Порядок гармоники ФОР		1+	2+	3+/f <sub>c</sub>	4+	5+	Р <sub>иОР</sub>	Р <sub>пОР</sub>	Р <sub>пОР</sub> / Р <sub>иОР</sub>
							мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
<b>Нагрузка 120% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	8,35	0,86	1183,53	0,72	3,09	40,30	4809,80	119,35
<b>ВпОР</b>	мкТл	63,40	64,88	1258,60	33,06	17,22			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	7,59	75,87	1,06	45,75	5,57			
<b>Номинальная нагрузка</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	2,32	4,11	945,87	2,97	1,43	16,6	3538,67	213
<b>ВпОР</b>	мкТл	52,98	58,00	1010,49	26,35	14,58			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	22,6	14,1	1,07	8,7	10,3			
<b>Нагрузка 80% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	2,31	1,99	1507,95	1,40	4,18	14,37	2901,43	201,90
<b>ВпОР</b>	мкТл	46,93	55,85	1627,26	19,04	10,87			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	20,31	28,07	1,08	13,61	2,60			
<b>Нагрузка 50% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	7,84	2,44	1725,89	1,75	2,68	38,85	1810,45	46,60
<b>ВпОР</b>	мкТл	39,18	43,51	1878,93	11,40	7,91			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	5,00	17,80	1,09	6,53	2,95			
<b>Нагрузка 30% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	3,49	2,81	1963,60	1,00	0,98	11,04	766,58	69,46
<b>ВпОР</b>	мкТл	25,66	28,85	2161,19	4,53	4,67			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	7,34	10,27	1,10	4,53	4,76			
<b>Нагрузка 15% от номинальной</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	1,80	4,66	2216,74	2,16	0,99	15,3	184,4	12,1
<b>ВпОР</b>	мкТл	11,91	14,83	2451,09	1,79	1,94			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	6,62	3,18	1,11	0,83	1,96			

На рис. 2.22–2.25 представлены графики относительного (относительно нагрузки 15%) изменения амплитуд гармоник ФОР при изменении нагрузки на валу ротора. На рис. 2.22–2.23 представлены графики изменения амплитуд для исправного АД №2, а на рис. 2.24–2.25 – для АД №2 с одним оборванным стержнем ОР.

Снижение нагрузки АД предсказуемо приводит к значительному уменьшению амплитуд гармоник ФОР и величины средней мощности, при этом также уменьшается и величина относительного изменения средней мощности ФОР. Исходя из этого можно предположить, что на АД, работающих в режиме близком к холостому ходу, могут быть проблемы с определением обрыва стержней ОР по ВМП.

Полученные результаты показали, что нагрузка на валу ротора оказывает значительное влияние на амплитуды гармоник ФОР ВМП, поэтому при проведении процедуры диагностирования необходимо учитывать текущую нагрузку АД.

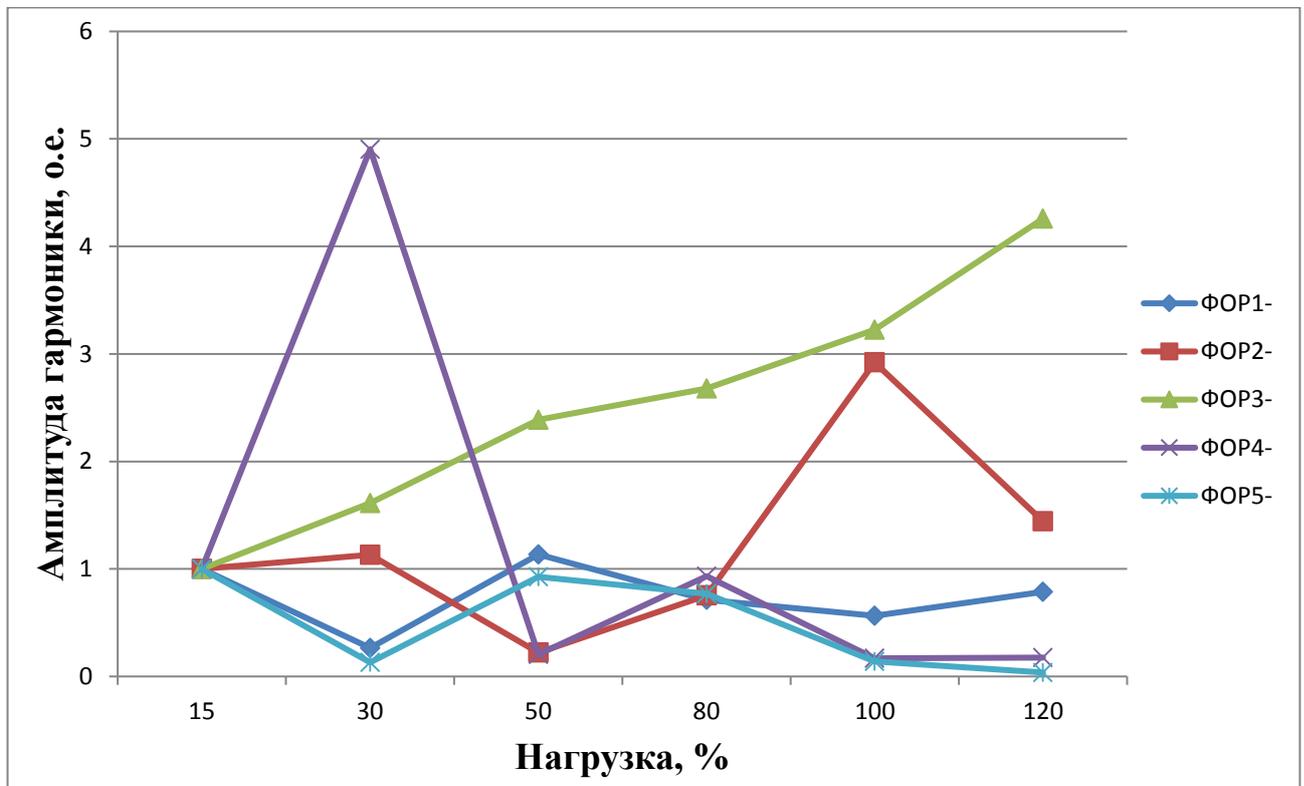


Рис. 2.22. Относительное изменение амплитуд гармоник  $ФОР_v$ - исправного АД №2, полученные с датчика Холла, при изменении нагрузки на валу ротора

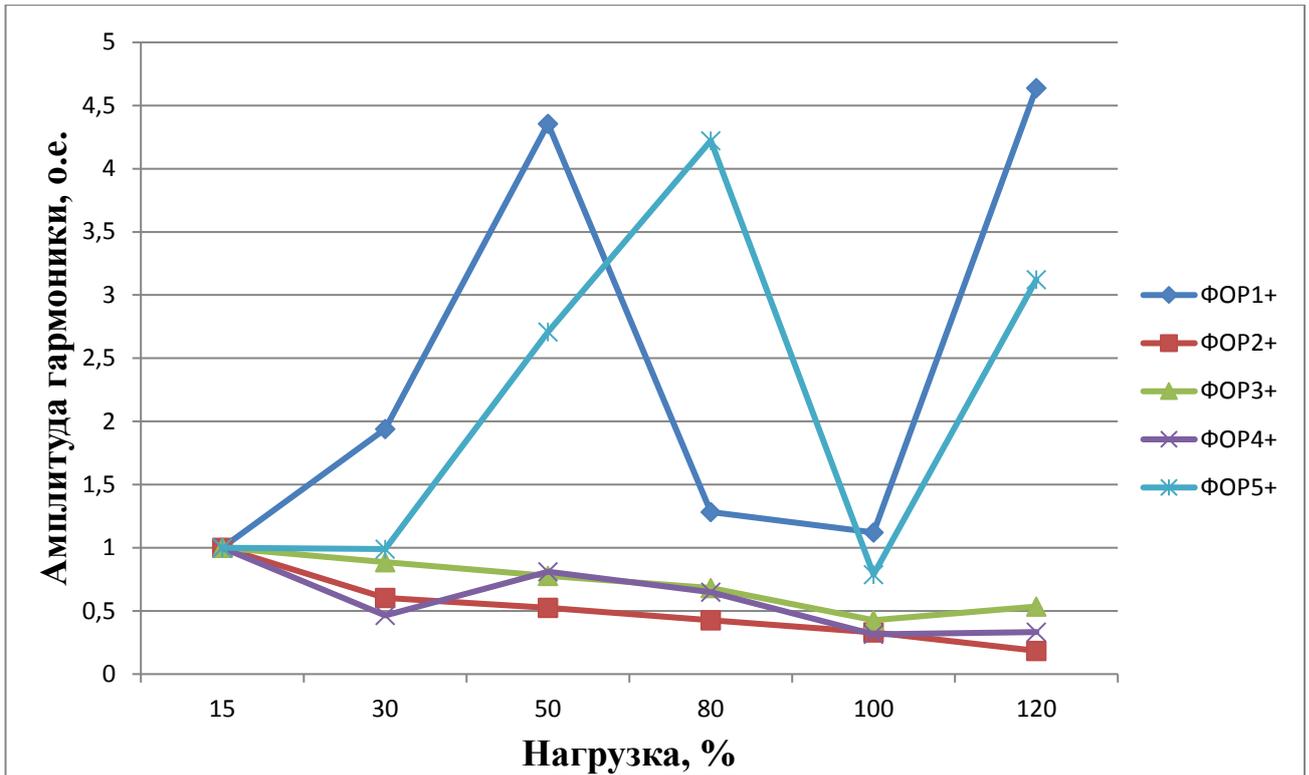


Рис. 2.23. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v+}$  исправного АД №2, полученные с датчика Холла, при изменении нагрузки на валу ротора

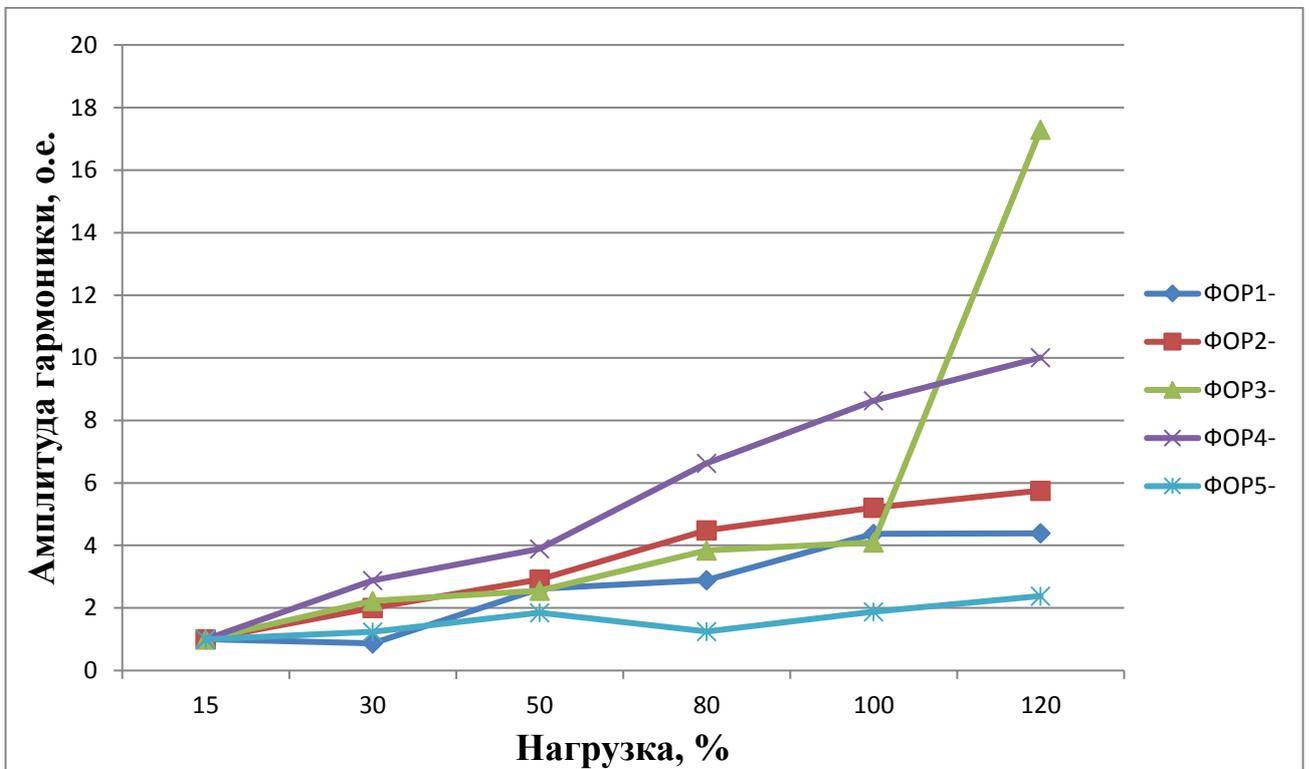


Рис. 2.24. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v-}$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при изменении нагрузки на валу ротора

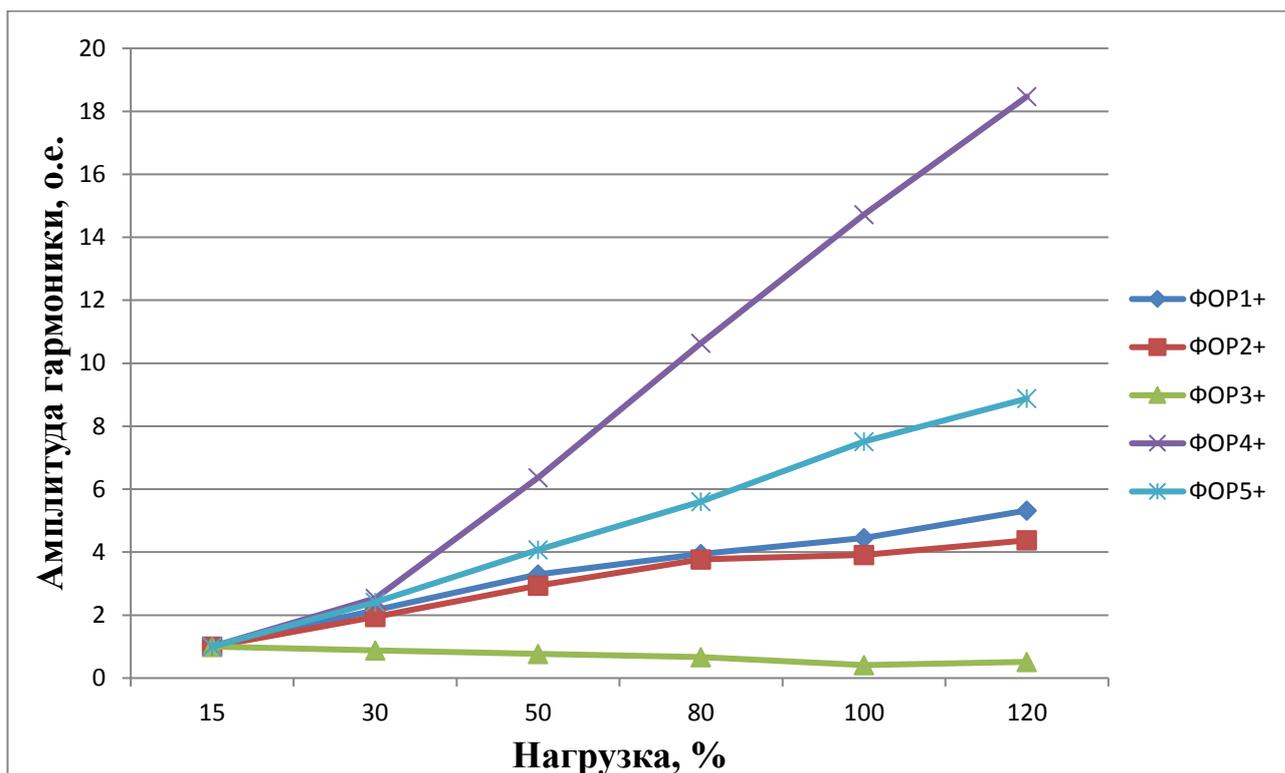


Рис. 2.25. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при изменении нагрузки на валу ротора

### 2.4.3. Исследование влияния эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя

В любом реальном двигателе поверхность ротора не может полностью соосно вращаться относительно внутренней поверхности статора, что приводит к колебаниям проводимости воздушного зазора АД. Воздушный зазор между статором и ротором оказывает существенное влияние на эксплуатационные параметры АД, например, увеличение воздушного зазора на 1% приводит к увеличению тока холостого хода на 0,6% и снижению коэффициента мощности на 0,3% [92].

Эксцентриситет ротора обусловлен неточностями в процессе производства и сборки, а также износом механической части двигателя. Он бывает статическим и динамическим, но в реальных двигателях всегда присутствуют оба вида. Однако,

именно динамический эксцентриситет является причиной появления во временном спектре магнитного поля воздушного зазора АД гармоник с частотой [84]:

$$f_{\varepsilon}^{(\nu_{\pm})} = f_c \cdot \left( 1 \pm \nu \cdot \frac{(1-s)}{p} \right) = f_c \pm \nu \cdot f_p, \quad (2.4)$$

где  $f_p$  – частота вращения ротора.

Проблема заключается в том, что значения частот гармоник эксцентриситета ротора (ГЭР) совпадают со значениями частот гармоник ФОР, что может серьезно повлиять на результат контроля состояния ОР.

Правило соответствия порядка гармоник ГЭР и ФОР может быть описано следующим выражением:

$$\nu_{\varepsilon} = \nu_{\text{ФОР}} - p, \quad (2.5)$$

где  $\nu_{\varepsilon}, \nu_{\text{ФОР}}$  – порядок гармоник ГЭР и ФОР соответственно.

В табл. 2.18 для АД №2 показаны частоты гармоник ФОР и соответствующие им частоты ГЭР, которые рассчитаны по выражениям (1.1) и (2.4) при скольжении  $s=0,055$ .

Таблица 2.18. Гармоники ФОР и соответствующие им гармоники ГЭР, для АД №2 при скольжении  $s=0,055$

Порядок гармоник ФОР	1-	2-	3-	4-	5-	1+	2+	3+/f <sub>c</sub>	4+	5+
Порядок гармоник ГЭР	4-	5-	6-	7-	8-	2-	1-	–	1+	2+
Частота, Гц	13	28,7	44,5	60,2	76	18,5	34,2	50	65,7	81,5

Как можно заметить из табл. 2.18, гармоники ФОР и ГЭР с одинаковой частотой имеют различные порядки, например, гармонике  $\text{ФОР}2+$  соответствует гармоника  $\text{ГЭР}1-$ , а  $\text{ФОР}1-$  –  $\text{ГЭР}4-$  и т.д. Необходимо отметить, что гармоникам  $\text{ФОР}\nu-$  соответствуют гармоники ГЭР более высоких порядков, нежели гармоникам  $\text{ФОР}\nu+$ . Это наблюдение позволяет предположить, что эксцентриситет ротора будет сильнее всего влиять на гармоники  $\text{ФОР}\nu+$ , так как им соответствуют гармоники ГЭР низких порядков, а чем меньше порядок гармоники, тем больше ее энергия. На гармоники  $\text{ФОР}\nu-$ , напротив, эксцентриситет

ротора должен оказывать минимальное влияние, что обусловлено высокими порядками гармоник ГЭР.

Величина неравномерности воздушного зазора (эксцентриситет) АД нормируется и, согласно, [92, 93] не должна превышать 10%. На практике, особенно на крупных и мощных АД, величина эксцентриситета ротора нередко превышает установленное нормативное значение, поэтому для последующего компьютерного моделирования была принята максимальная величина эксцентриситета в 30%.

В процессе компьютерного моделирования влияния эксцентриситета ротора на ВМП АД рассматривались следующие варианты:

1. эксцентриситет отсутствует;
2. статический эксцентриситет 10%;
3. динамический эксцентриситет 10%;
4. статический эксцентриситет 20%;
5. динамический эксцентриситет 20%;
6. статический эксцентриситет 30%;
7. динамический эксцентриситет 30%.

Для АД №2 рассматривались все вышеперечисленные варианты, а для АД №1 только динамический эксцентриситет. Во всех режимах нагрузка на валу ротора была равна номинальной.

На рис. 2.26, 2.27 показаны изменения в спектрах ВМП АД №1 и №2 соответственно при различных видах эксцентриситета ротора.

В табл. 2.21–2.26 представлены амплитуды и средняя мощность, гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  и  $\Phi OP_{\nu+}$  АД №1 и №2, при различных видах эксцентриситета ротора.

На рис. 2.28, 2.29 представлены графики относительного (относительно варианта без эксцентриситета) изменения амплитуд гармоник ФОР АД №1 с одним оборванным стержнем ОР при различных вариантах эксцентриситета ротора.

На рис. 2.30–2.33 представлены графики относительного (относительно исправного) изменения амплитуд гармоник ФОР АД №2 с одним оборванным стержнем ОР при различных вариантах эксцентриситета ротора.

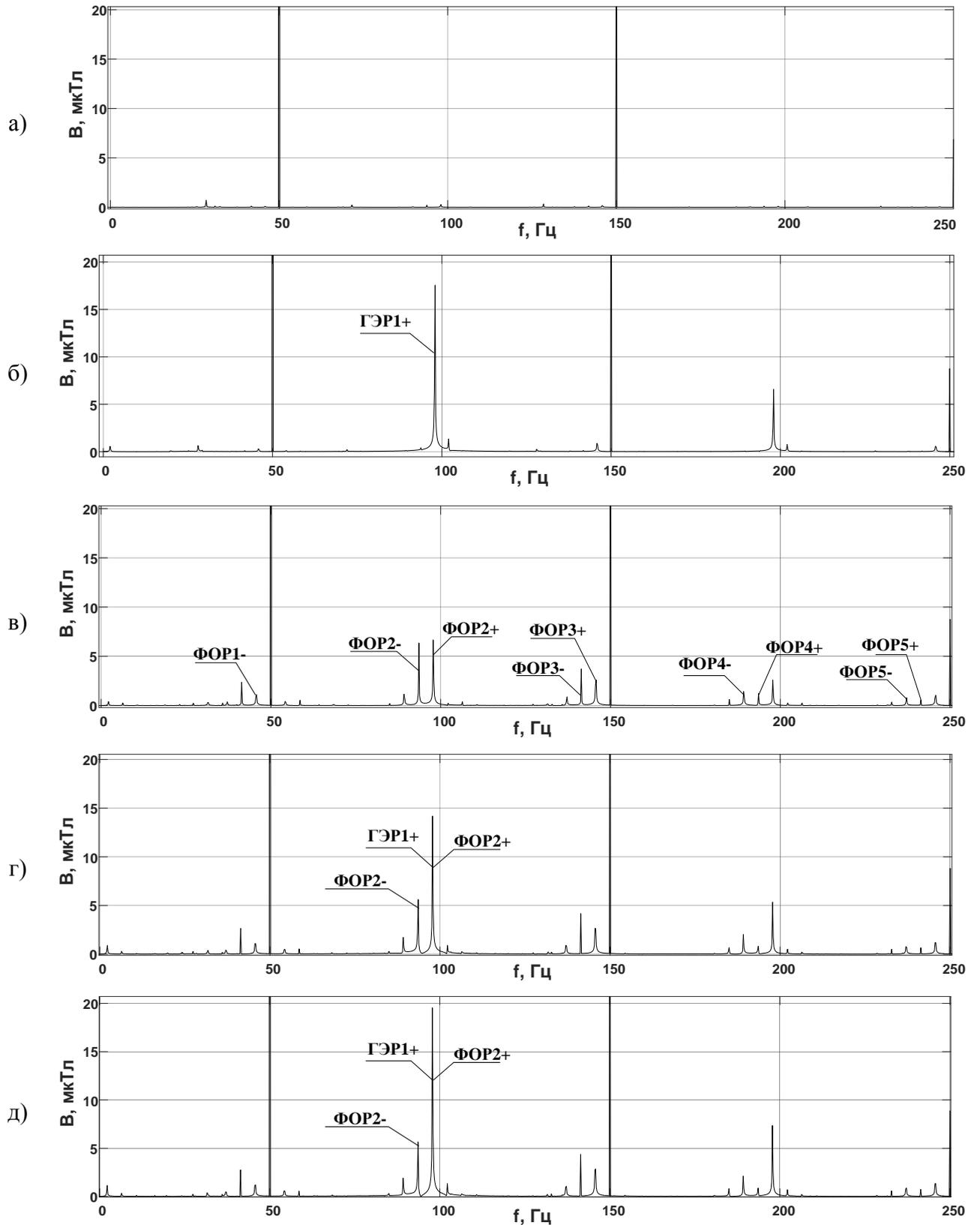


Рис. 2.26. Спектры сигналов, полученных с датчика Холла АД №1:

а – исправная обмотка ротора; б – исправная обмотка ротора, динамический эксцентриситет 30%; в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем; г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем, динамический эксцентриситет 20%; д – обмотка ротора с одним оборванным стержнем, динамический эксцентриситет 30%.

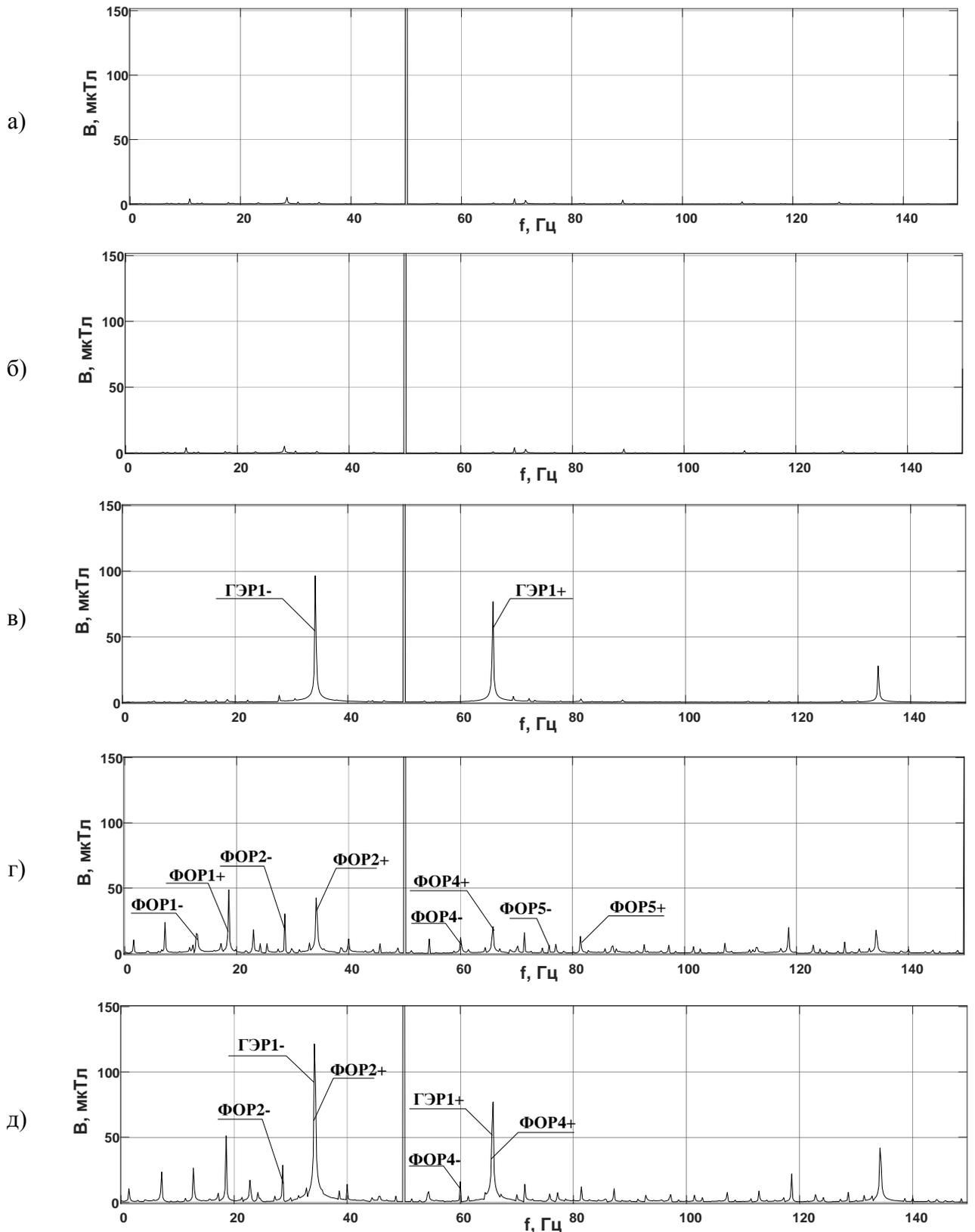


Рис. 2.27. Спектры сигналов, полученных с датчика Холла АД №2:

а – исправная обмотка ротора; б – исправная обмотка ротора, статический эксцентриситет 20%; в – исправная обмотка ротора, динамический эксцентриситет 20%; г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем; д – обмотка ротора с одним оборванным стержнем, динамический эксцентриситет 20%.

Таблица 2.19. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OPv-$  АД №1 с исправной обмоткой ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	<b>В</b> , мкТл	0,09	0,22	0,15	0,13	0,10	0,05
Динамический эксцентриситет 10%	<b>В</b> , мкТл	0,06	0,28	0,09	0,16	0,26	0,09
Динамический эксцентриситет 20%	<b>В</b> , мкТл	0,11	0,35	0,19	0,15	0,17	0,11
Динамический эксцентриситет 30%	<b>В</b> , мкТл	0,61	0,42	0,22	0,12	0,27	0,34

Таблица 2.20. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OPv+$  АД №1 с исправной обмоткой ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1+/f <sub>c</sub>	2+	3+	4+	5+	РФОР+
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	<b>В</b> , мкТл	334,29	0,87	0,33	0,11	0,09	0,44
Динамический эксцентриситет 10%	<b>В</b> , мкТл	334,63	7,31	0,03	0,13	0,03	26,75
Динамический эксцентриситет 20%	<b>В</b> , мкТл	334,96	13,74	0,60	0,12	0,04	94,64
Динамический эксцентриситет 30%	<b>В</b> , мкТл	335,76	20,37	1,57	0,10	0,08	208,69

Таблица 2.21. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OPv-$  АД №1 с одним оборванным стержнем в обмотке ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	<b>В</b> , мкТл	6,03	6,59	3,84	1,78	1,13	49,49
Динамический эксцентриситет 10%	<b>В</b> , мкТл	6,14	6,37	4,03	2,00	1,12	49,83
Динамический эксцентриситет 20%	<b>В</b> , мкТл	5,91	6,33	4,17	2,20	1,30	49,45
Динамический эксцентриситет 30%	<b>В</b> , мкТл	5,88	6,25	4,38	2,36	1,29	50,02

Таблица 2.22. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АД №1 с одним оборванным стержнем в обмотке ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		$1+1/f_c$	2+	3+	4+	5+	РФОР+
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	<b>В</b> , мкТл	334,90	7,74	4,67	1,17	0,53	41,70
Динамический эксцентриситет 10%	<b>В</b> , мкТл	335,12	10,74	4,76	1,01	0,58	69,73
Динамический эксцентриситет 20%	<b>В</b> , мкТл	335,55	15,91	5,03	0,96	0,66	139,91
Динамический эксцентриситет 30%	<b>В</b> , мкТл	336,45	21,97	5,18	1,00	0,75	255,51

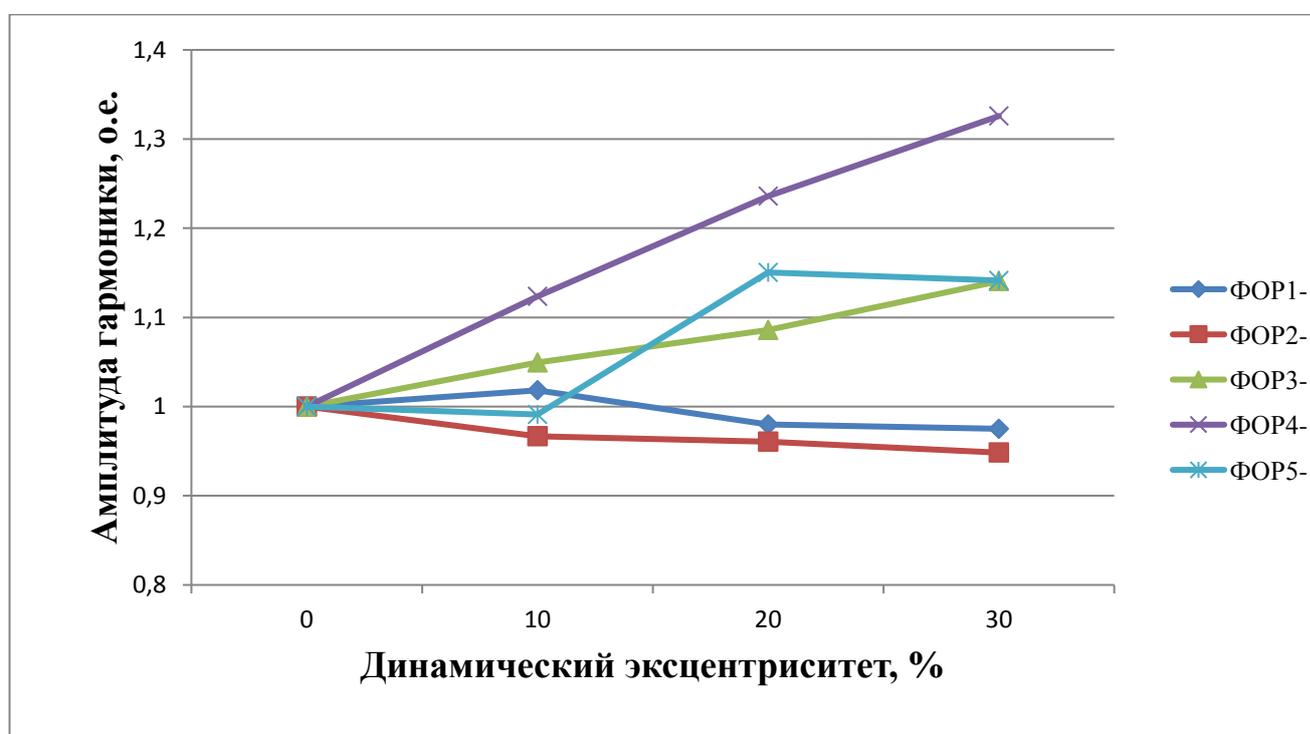


Рис. 2.28. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v-}$  АД №1 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при различных вариантах динамического эксцентриситета ротора

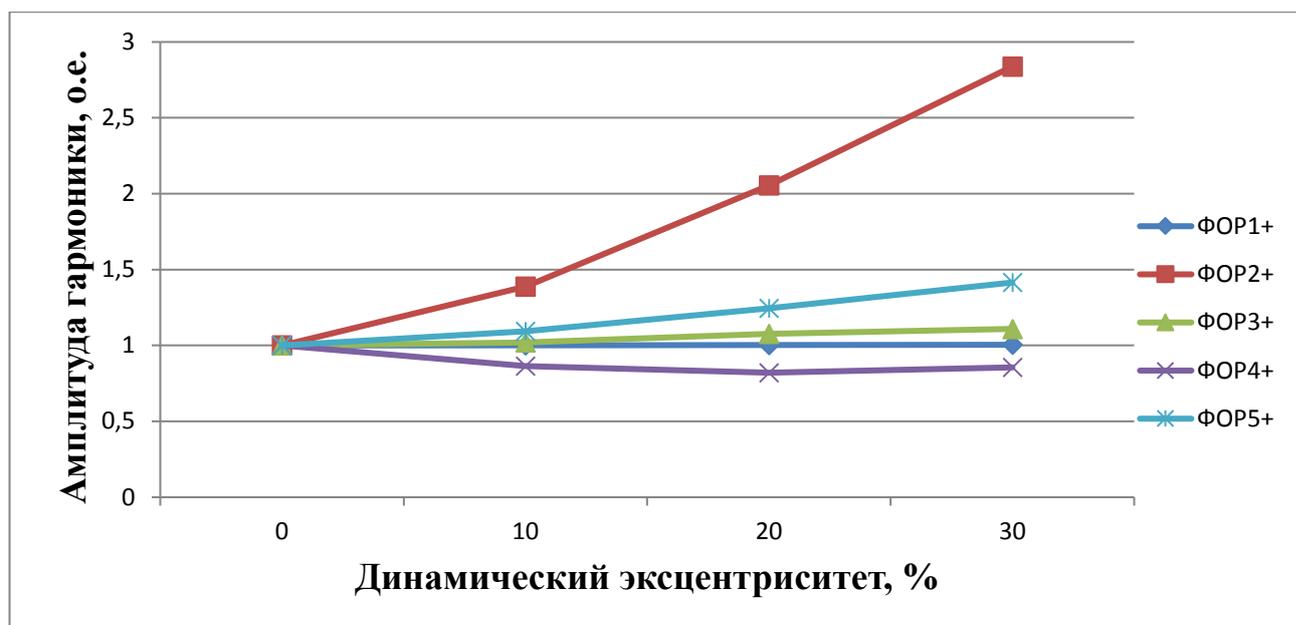


Рис. 2.29. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АД №1 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при различных вариантах динамического эксцентриситета ротора

Таблица 2.23. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{v-}$  АД №2 с исправной обмоткой ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	В, мкТл	1,38	7,93	2,72	0,23	0,80	36,40
Статический эксцентриситет 10%	В, мкТл	1,6	7,5	2,4	0,9	3,1	37,5
Статический эксцентриситет 20%	В, мкТл	1,66	7,86	2,43	1,06	0,67	36,05
Статический эксцентриситет 30%	В, мкТл	1,17	4,57	2,55	0,23	1,10	14,99
Динамический эксцентриситет 10%	В, мкТл	1,9	7,2	1,0	0,8	0,3	28,4
Динамический эксцентриситет 20%	В, мкТл	1,62	8,10	1,37	1,57	0,32	36,35
Динамический эксцентриситет 30%	В, мкТл	1,80	7,63	2,68	0,67	0,37	34,61

Таблица 2.24. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP\nu+$  АД №2 с исправной обмоткой ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1+	2+	3+/f <sub>c</sub>	4+	5+	РФОР+
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	В, мкТл	2,02	1,54	945	0,68	0,78	3,77
Статический эксцентриситет 10%	В, мкТл	1,3	1,7	984	0,8	0,6	2,8
Статический эксцентриситет 20%	В, мкТл	1,66	1,34	1022	0,99	0,52	2,90
Статический эксцентриситет 30%	В, мкТл	1,90	1,81	1060	1,15	2,96	8,47
Динамический эксцентриситет 10%	В, мкТл	2,8	56,9	944	47,7	1,9	2760,5
Динамический эксцентриситет 20%	В, мкТл	4,03	113,22	951	92,52	3,99	10704
Динамический эксцентриситет 30%	В, мкТл	6,36	169,67	965	137,63	7,21	23910

Таблица 2.25. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP\nu-$  АД №2 с одним оборванным стержнем в обмотке ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	В, мкТл	24,79	34,87	16,43	17,91	8,10	951
Статический эксцентриситет 10%	В, мкТл	25,71	32,35	4,28	15,80	5,74	1004
Статический эксцентриситет 20%	В, мкТл	26,82	30,99	4,53	16,00	7,71	1007
Статический эксцентриситет 30%	В, мкТл	27,22	32,60	14,16	16,79	4,97	1155
Динамический эксцентриситет 10%	В, мкТл	24,57	31,46	14,08	16,04	7,83	1055
Динамический эксцентриситет 20%	В, мкТл	29,63	30,99	13,95	16,92	8,88	1198
Динамический эксцентриситет 30%	В, мкТл	29,62	31,52	14,11	18,15	9,22	1242

Таблица 2.26. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АД №2 с одним оборванным стержнем в обмотке ротора, полученные с датчика Холла, при различных вариантах эксцентриситета ротора

Порядок гармоники ФОР		1+	2+	3+/f <sub>c</sub>	4+	5+	РФОР+
							мкТл <sup>2</sup>
Эксцентриситет отсутствует	В, мкТл	52,9	58	1010	26,3	14,58	3538
Статический эксцентриситет 10%	В, мкТл	52,7	59,1	1054	26,6	14,36	3599
Статический эксцентриситет 20%	В, мкТл	51,8	60,2	1098	26,7	14,49	3622
Статический эксцентриситет 30%	В, мкТл	51,2	61,5	1145	26,6	13,54	3654
Динамический эксцентриситет 10%	В, мкТл	52,9	113,4	1010	62,3	14,59	9880
Динамический эксцентриситет 20%	В, мкТл	52,7	169	1018	107,5	12,72	21684
Динамический эксцентриситет 30%	В, мкТл	52,7	227	1037	154,7	11,15	39292

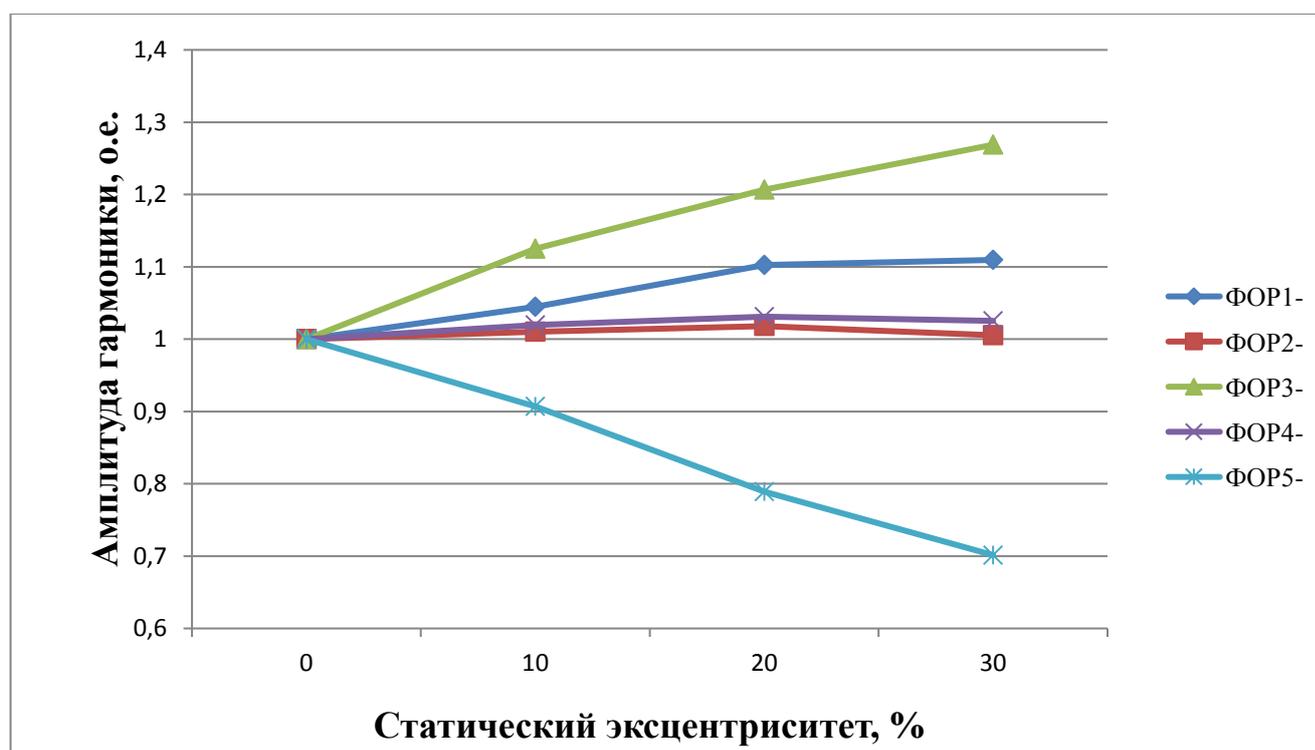


Рис. 2.30. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v-}$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при различных вариантах статического эксцентриситета ротора

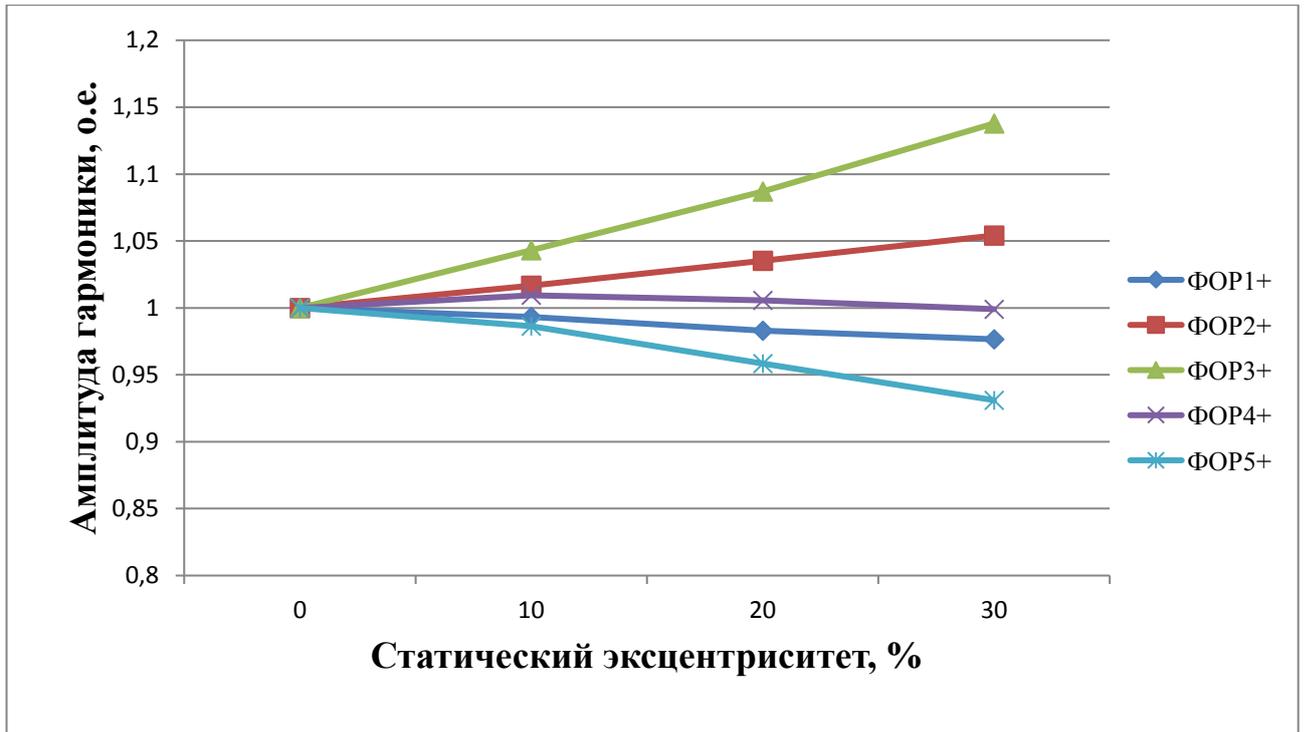


Рис. 2.31. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при различных вариантах статического эксцентриситета ротора

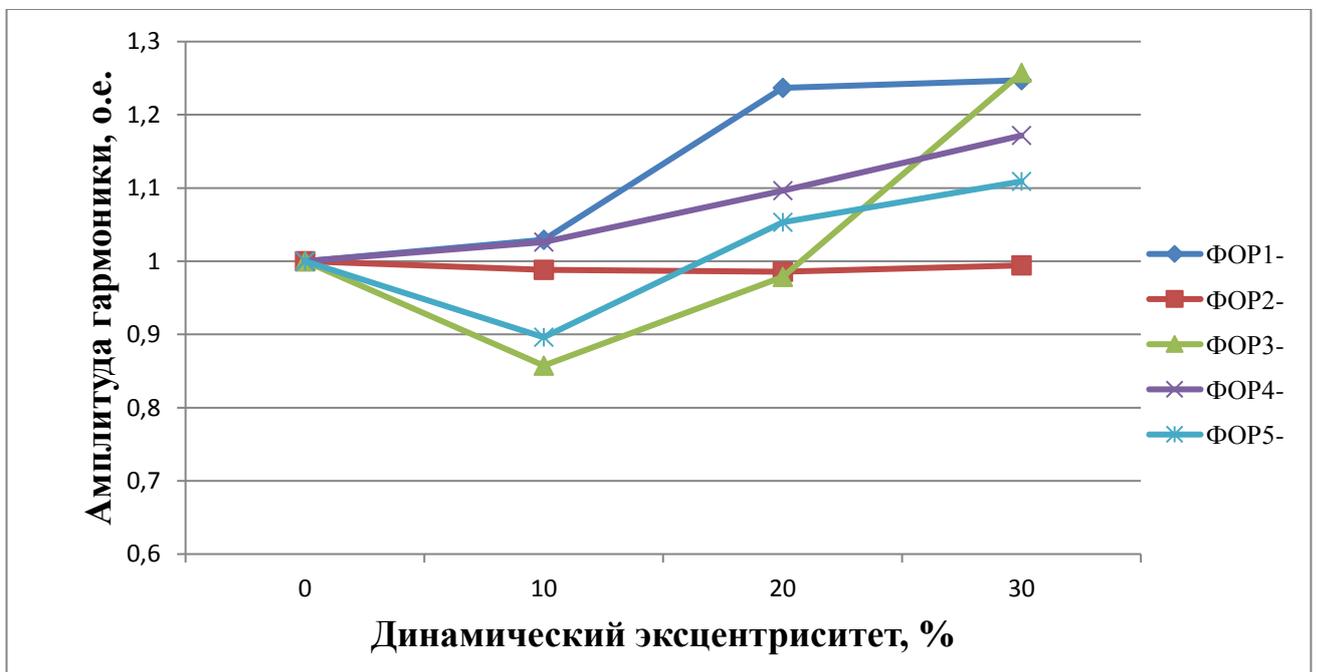


Рис. 2.32. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OPv-$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при различных вариантах динамического эксцентриситета ротора

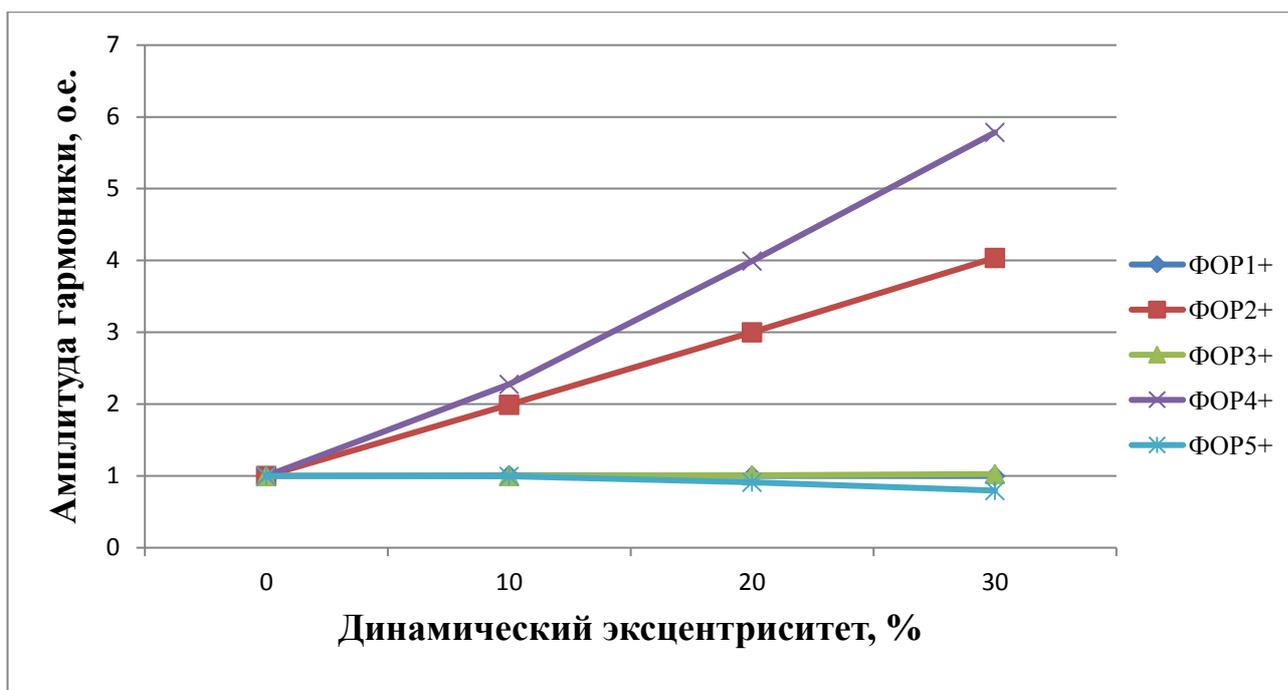


Рис. 2.33. Относительное изменение амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АД №2 с оборванным стержнем ОР, полученные с датчика Холла, при различных вариантах динамического эксцентриситета

Судя по представленным результатам, статический эксцентриситет оказывает очень незначительное влияние на амплитуды гармоник ФОР ВМП и не вызывает значительного изменения средней мощности сигнала.

Динамический эксцентриситет, как и предполагалось, существенно влияет на спектр ВМП в целом и гармоники ФОР в частности. Как и ожидалось, особенно сильно динамический эксцентриситет влияет на амплитуды гармоник, частоты которых совпадают с частотами  $\Phi OP_{v+}$ . При этом на АД с ИОР увеличение амплитуд соответствующих гармоник, вызванное динамическим эксцентриситетом, может превышать таковое для АД с оборванным стержнем ОР. Таким образом, можно сделать вывод, что динамический эксцентриситет ротора может существенно повлиять на результаты контроля ОР.

Как можно заметить, динамический эксцентриситет очень существенно повлиял только на гармоники  $\Phi OP_{v+}$ , частота которых совпадает с частотами ГЭР первого порядка. Например, для АД №2 это гармоника  $\Phi OP_{2+}$ , которой соответствует гармоника  $ГЭР_{1-}$  и гармоника  $\Phi OP_{4+}$ , которой соответствует

$\Gamma \text{ЭР} I +$ . Амплитуды гармоник  $\Phi \text{ОР} \nu -$  при этом практически не изменялись, значительно увеличиваясь только в случае обрыва стержней ОР.

На основании данного наблюдения с целью обеспечения достоверности результата контроля состояния ОР АД по ВМП в качестве диагностического сигнала наиболее целесообразно использовать сигнал, состоящий либо из нижних и верхних боковых гармоник ФОР ( $\Phi \text{ОР} \nu \pm$ ) за исключением гармоник, частоты которых совпадают с частотами ГЭР первого порядка и частотой сети, либо из одних нижних боковых гармоник ФОР ( $\Phi \text{ОР} \nu -$ ).

В данной работе выбран второй вариант диагностического сигнала. В качестве диагностического параметра обрыва стержней ОР решено использовать среднюю мощность этого сигнала, которую можно определить по следующему выражению:

$$P_{\Phi \text{ОР} -} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^5 B_{\nu -}^2. \quad (2.6)$$

## **2.5. Исследование изменений внешнего магнитного поля при удалении точки измерения от корпуса электродвигателя**

При разработке метода контроля состояния ОР АД по ВМП нельзя оставить без внимания вопрос помехозащищенности. Проанализируем основные возможные источники электромагнитных помех, которые теоретически могут привести к некорректным результатам контроля АД.

### **1. Магнитные поля от силовых цепей.**

В данном случае электромагнитные поля будут содержать составляющие с частотами, равными частоте сети и кратными ей, что не должно повлиять на результаты контроля, так как для определения состояния ОР предлагается использовать гармоники ФОР с частотами, отличными от частоты сети и не кратными ей.

### **2. Магнитные поля, вызванные процессами искрения и дугообразования.**

Процессы искрения и дугообразования приводят к появлению высокочастотных электромагнитных полей с частотами в сотни кГц [6]. Столь высокочастотные составляющие не должны влиять на результаты контроля, так как используются низкочастотные составляющие ВМП АД.

### 3. Магнитные поля от соседних электродвигателей.

Однотипные АД, работающие с одинаковой нагрузкой, должны создавать практически одинаковое по своему спектральному составу ВМП. В случае близкого расположения таких АД их магнитные поля могут накладываться друг на друга, что теоретически может повлиять на результаты контроля. Для того чтобы точно ответить на вопрос возможного влияния АД друг на друга, необходимо проанализировать изменения ВМП при его удалении от корпуса АД.

Для этого было произведено компьютерное моделирование АД №2 с одним оборванным стержнем ОР, при этом точка регистрации ВМП последовательно удалялась от корпуса АД на расстояние вплоть до 40 см. В каждой точке определялись амплитуды гармоник ФОР, результаты представлены в табл. 2.27, 2.28.

На графиках, представленных на рис. 2.34, 2.35, показан характер затухания амплитуд гармоник ФОР относительно значений, полученных при измерении на корпусе АД.

Полученные результаты показывают, что при удалении от корпуса АД амплитуды гармонических составляющих ВМП весьма быстро уменьшаются. Например, при удалении на 10 см от корпуса АД амплитуда гармоники на частоте сети уменьшилась в 50 раз.

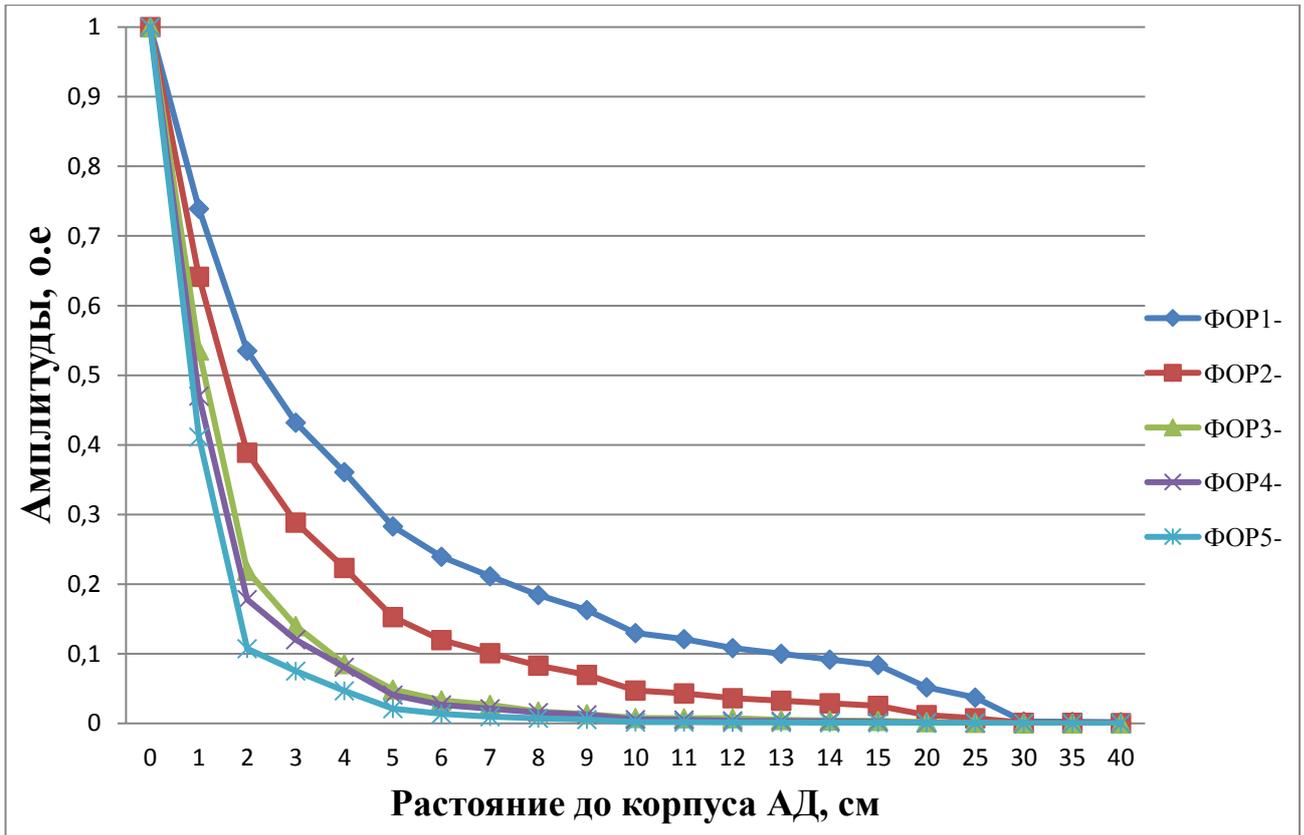
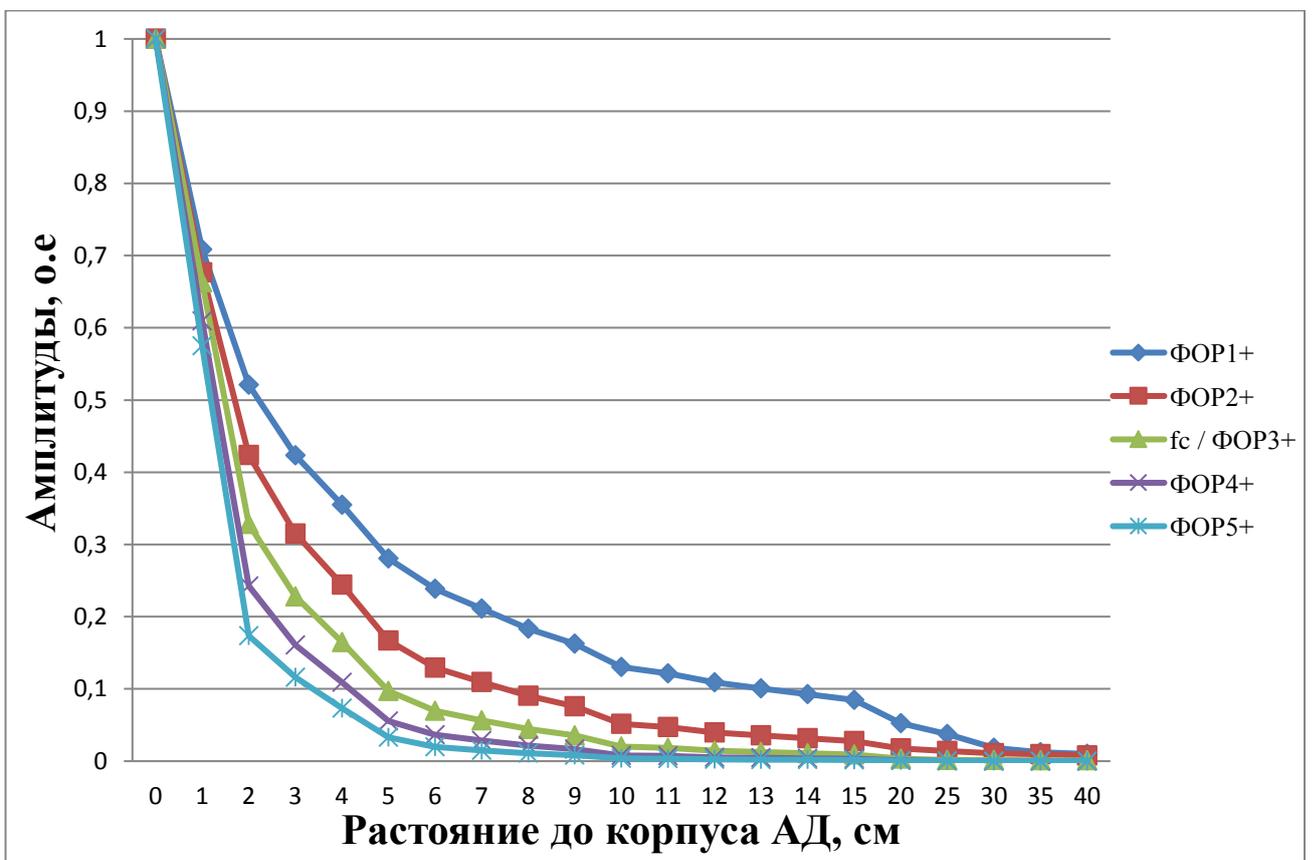
На графиках, представленных на рис. 2.34, 2.35, затухание гармоник происходит в соответствии с их порядком. Чем выше порядок гармоники и, соответственно, ее частота, тем быстрее она затухает, что соответствует известной теории распространения электромагнитного поля [97, 98]

Таблица 2.27. Амплитуды гармоник  $\Phi OPv$ -, полученные с датчика Холла АД №2 при удалении точки измерения от корпуса АД

Расстояние до корпуса, см	Порядок гармоники ФОР	1-	2-	3-	4-	5-	РФОР-
							мкТл <sup>2</sup>
0	<b>В</b> , мкТл	24,79	34,87	16,43	17,91	8,1	951,68
1	<b>В</b> , мкТл	18,33	22,37	8,8	8,42	3,33	471,52
2	<b>В</b> , мкТл	13,27	13,56	3,6	3,19	0,87	188,49
3	<b>В</b> , мкТл	10,71	10,06	2,3	2,15	0,61	112,00
4	<b>В</b> , мкТл	8,95	7,79	1,4	1,45	0,38	72,28
5	<b>В</b> , мкТл	7,02	5,32	0,8	0,73	0,17	39,37
6	<b>В</b> , мкТл	5,93	4,18	0,54	0,48	0,11	26,60
7	<b>В</b> , мкТл	5,24	3,52	0,44	0,38	0,08	20,13
8	<b>В</b> , мкТл	4,57	2,89	0,28	0,28	0,058	14,69
9	<b>В</b> , мкТл	4,04	2,43	0,22	0,22	0,044	11,14
10	<b>В</b> , мкТл	3,22	1,65	0,13	0,1	0,017	6,54
11	<b>В</b> , мкТл	3	1,51	0,12	0,09	0,016	5,65
12	<b>В</b> , мкТл	2,68	1,27	0,12	0,07	0,012	4,42
13	<b>В</b> , мкТл	2,48	1,14	0,08	0,06	0,01	3,74
14	<b>В</b> , мкТл	2,28	1,01	0,072	0,05	0,009	3,12
15	<b>В</b> , мкТл	2,08	0,88	0,06	0,04	0,007	2,56
20	<b>В</b> , мкТл	1,29	0,42	0,028	0,012	0,007	0,92
25	<b>В</b> , мкТл	0,92	0,25	0,015	0,006	0,007	0,45
30	<b>В</b> , мкТл	0,072	0,032	≈0	≈0	≈0	0,027
35	<b>В</b> , мкТл	0,054	0,026	≈0	≈0	≈0	0,011
40	<b>В</b> , мкТл	0,045	0,02	≈0	≈0	≈0	0,006

Таблица 2.28. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu+$ , полученные с датчика Холла АД №2 при удалении точки измерения от корпуса

Расстояние до корпуса, см	Порядок гармоники $\Phi OP$	1+	2+	3+/ $f_c$	4+	5+	$R_{\Phi OP+}$
							мкТл <sup>2</sup>
0	<b>B</b> , мкТл	52,98	58	1010,49	26,35	14,58	3538,67
1	<b>B</b> , мкТл	37,53	39,25	669,81	16,06	8,38	1638,91
2	<b>B</b> , мкТл	27,6	24,59	331,89	6,39	2,53	706,96
3	<b>B</b> , мкТл	22,42	18,26	230,26	4,24	1,69	428,45
4	<b>B</b> , мкТл	18,8	14,18	166,4	2,87	1,07	281,85
5	<b>B</b> , мкТл	14,87	9,69	98,23	1,46	0,48	158,68
6	<b>B</b> , мкТл	12,64	7,51	70,33	0,96	0,29	108,62
7	<b>B</b> , мкТл	11,18	6,35	57,07	0,75	0,22	82,99
8	<b>B</b> , мкТл	9,72	5,24	44,74	0,57	0,16	61,16
9	<b>B</b> , мкТл	8,61	4,4	35,9	0,44	0,12	46,88
10	<b>B</b> , мкТл	6,9	3	20,4	0,21	0,053	28,31
11	<b>B</b> , мкТл	6,44	2,74	18,49	0,19	0,049	24,50
12	<b>B</b> , мкТл	5,77	2,31	14,76	0,14	0,037	19,33
13	<b>B</b> , мкТл	5,34	2,07	12,93	0,12	0,032	16,41
14	<b>B</b> , мкТл	4,91	1,84	11,12	0,1	0,027	13,75
15	<b>B</b> , мкТл	4,48	1,61	9,35	0,086	0,022	11,34
20	<b>B</b> , мкТл	2,79	1,02	3,36	0,025	0,008	4,18
25	<b>B</b> , мкТл	1,99	0,82	1,74	0,012	0,004	2,09
30	<b>B</b> , мкТл	0,97	0,631	1,586	$\approx 0$	$\approx 0$	0,645
35	<b>B</b> , мкТл	0,65	0,548	1,19	$\approx 0$	$\approx 0$	0,362
40	<b>B</b> , мкТл	0,53	0,459	0,997	$\approx 0$	$\approx 0$	0,255

Рис. 2.34. Затухание гармоник  $\Phi O P v-$  АД №2Рис. 2.35. Затухание гармоник  $\Phi O P v+$  АД №2

Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод, что ввиду стремительного затухания ВМП даже в случае близкого расположения АД взаимное влияние их ВМП друг на друга будет крайне незначительным, так как амплитуды информативных гармоник слишком малы.

Единственным маловероятным исключением, которое можно предположить, будет ситуация, когда либо один, либо сразу несколько близкорасположенных АД работают через преобразователь частоты. В этом случае может сложиться такая ситуация, когда частота основной гармоники АД, работающего через преобразователь частоты, совпадет или будет близка к частоте информативной гармоники соседнего АД. Учитывая, что основная гармоника АД обычно на два порядка больше любой другой гармоники, то даже после затухания ее амплитуда может быть сопоставима с амплитудами информативных гармоник.

На основании вышесказанного можно предположить, что диагностирование ОР АД по ВМП в условиях реальной эксплуатации вполне возможно, а вероятность влияния электромагнитных помех на результаты крайне мала.

## **Выводы по главе 2**

1. В программном комплексе Ansys Maxwell созданы математические модели, основанные на методе конечных элементов, которые позволяют исследовать ВМП и магнитное поле воздушного зазора АД.

2. Математическое моделирование показало, что в спектре ВМП АД присутствуют гармонические составляющие, частоты которых зависят от скольжения.

3. Установлено, что гармоники ФОР присутствуют в ВМП АД и при обрывах стержней ОР значительно увеличивают свои амплитуды, что может служить диагностическим признаком наличия неисправности.

4. Проведенный анализ влияния на спектр ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов (несимметрия напряжения, статический и

динамический эксцентриситет, нагрузка на валу ротора), изменяющихся в допустимых пределах, показал, что в качестве диагностического параметра наличия обрывов стержней ОР целесообразно использовать среднюю мощность сигнала, состоящего из нижних боковых гармоник ФОР ( $\Phi OP_{\nu}$ -), а в качестве диагностического признака наличия неисправности – значительное увеличение этого параметра.

5. Математическое моделирование показало, что при удалении от корпуса электродвигателя магнитное поле быстро затухает и в условиях реальной эксплуатации соседние АД никак не повлияют на результат регистрации ВМП.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

### 3.1. Постановка задачи

Как было показано в главе 2, во ВМП АД присутствуют информативные гармонические составляющие, частоты которых зависят от частоты сети, скольжения и числа пар полюсов. Зная эти параметры можно автоматически находить любые гармоники, генерируемые АД.

Для получения корректных результатов диагностирования АД на основе спектрального анализа ВМП необходимо с высокой точностью определять амплитуды и частоты нужных гармоник. Для этого необходим соответствующий инструмент – анализатор спектра.

Выпускаемые промышленностью современные анализаторы спектра способны с высокой точностью определять амплитуды и частоты гармонических составляющих сигнала. Однако для такой узкоспециализированной задачи определения амплитуд и частот гармоник, характерных для повреждения узлов электродвигателя, существующие анализаторы плохо подходят, так как стоят очень дорого и требуют доработки программного обеспечения, что не всегда возможно.

Традиционные методы спектрального анализа, основанные на БПФ или ОПФ уже не устраивают разработчиков способов контроля электродвигателей, так как не могут обеспечить нужную точность и стабильность результатов, особенно при уменьшении времени регистрации сигналов. В связи с этим некоторые авторы разрабатывают специальные анализаторы спектра для контроля асинхронных двигателей [85–88]. Однако все эти анализаторы, которые построены на основе совершенно разных операций, в настоящее время находятся на стадии исследования (разработки) и не имеют практического применения.

Таким образом, для спектрального анализа сигналов от асинхронного электродвигателя требуется разработка специализированного анализатора спектра, позволяющего с высокой точностью определять амплитуды и частоты любых

гармонических составляющих сигнала и не требующего при этом большого времени записи сигнала.

Использование дополнительных устройств для измерения скольжения и частоты сети сопряжено со значительными эксплуатационными трудностями, поэтому разрабатываемый анализатор спектра должен самостоятельно определять эти параметры.

### **3.2. Разработка способа определения скольжения асинхронного электродвигателя по внешнему магнитному полю**

В магнитном поле воздушного зазора АД всегда присутствует ряд гармонических составляющих, которые несут в себе информацию о скольжении. Как показало математическое моделирование, проведенное в главе 2, магнитное поле из воздушного зазора выходит за пределы корпуса АД и обладает тем же гармоническим составом. Исходя из этого, по практическим соображениям, наиболее рациональным представляется определение скольжения непосредственно по гармоникам ВМП. На основе анализа литературных источников к дальнейшему рассмотрению были приняты следующие способы определения скольжения.

В работе [5] скольжение предлагается определять по зубцовым гармоникам ротора (ЗГР) или гармоникам эксцентриситета ротора (ГЭР), которые присутствуют в спектрах магнитного поля воздушного зазора, токе статора и, как показало математическое моделирование, в ВМП АД.

Частоты гармоник, вызванных зубчатостью ротора, можно определить по следующему выражению [84]:

$$f_{ЗГР}^{(v\pm)} = \nu \cdot \frac{Z_p}{p} \cdot f_c \cdot (1 - s) \pm f_c. \quad (3.1)$$

Искомые ЗГР находятся путем определения в области поиска частотной составляющей спектра с максимальной амплитудой (рис.3.1).

Зависимость длины зоны поиска ЗГР  $\Delta f_{\text{диап.ЗГР}}$  от числа пар полюсов  $p$  и числа стержней обмотки ротора  $Z_p$  АД выглядит следующим образом:

$$\Delta f_{\text{диап.ЗГР}} = \frac{Z_p}{p} \cdot f_c \cdot s_{\text{макс}}, \quad (3.2)$$

где  $s_{\text{макс}}$  – максимальное рабочее значение скольжения.

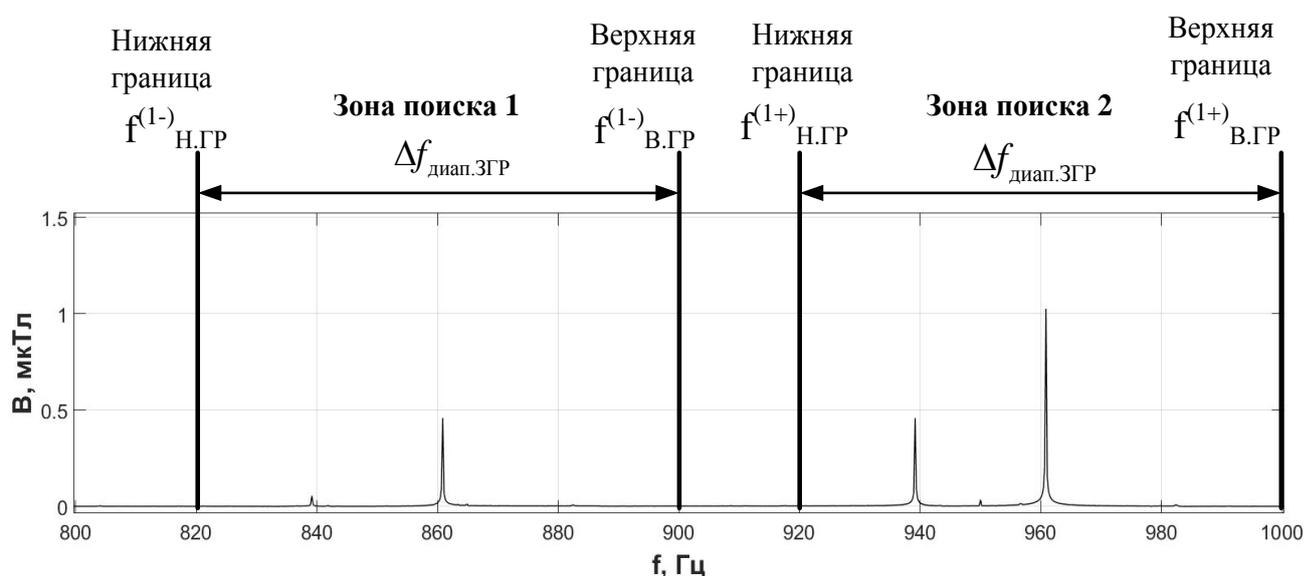


Рис. 3.1. Области поиска зубцовых гармоник ротора для АД №1

Скольжение определяется следующим образом. Сначала по формулам (3.3, 3.4) рассчитывается значение скольжения для правого и левого лепестка ЗГР. Итоговое скольжение определяется как среднее арифметическое этих значений:

$$s_{\text{ЗГР}}^{(1-)} = 1 - \frac{f_{\text{ЗГР}}^{(1-)} + f_c}{f_c} \cdot \frac{p}{Z_p}; \quad (3.3)$$

$$s_{\text{ЗГР}}^{(1+)} = 1 - \frac{f_{\text{ЗГР}}^{(1+)} - f_c}{f_c} \cdot \frac{p}{Z_p}. \quad (3.4)$$

Минимальное время записи сигнала  $T_{\text{зап.ЗГР}}^{\text{мин}}$  при использовании ЗГР для определения значения скольжения можно рассчитать по следующему выражению [5, 95]:

$$T_{\text{зан.ЗГР}}^{\text{мин}} = \frac{\varepsilon_{\text{макс}} \cdot s_m + 100 \cdot \left(2 \cdot \frac{p}{Z_p} + 1 - s_m\right)}{2 \cdot \varepsilon_{\text{макс}} \cdot s_m \cdot f_c}, \quad (3.5)$$

где  $\varepsilon_{\text{макс}}$  – максимальная погрешность определения скольжения в %;  $s_m$  – точное значение скольжения (о.е).

Среди недостатков этого способа можно отметить:

- отсутствие легкодоступной информации о числе стержней ОР (эта информация не всегда приводится даже в справочниках);
- для определения скольжения с высокой точностью может потребоваться достаточно длительное время записи сигнала (порядка двух минут). Кроме того, при длительной записи сигнала нагрузка на валу ротора АД может измениться, что приведет к невозможности определения правильного значения скольжения.

Эксцентриситет ротора обусловлен неточностями в процессе производства и сборки, а также износом механической части двигателя. Эксцентриситет ротора бывает статическим и динамическим, однако в реальных двигателях всегда присутствуют оба вида эксцентриситета. Однако, именно динамический эксцентриситет является причиной появления во временном спектре магнитного поля воздушного зазора АД гармоник с частотами, определяемыми выражением (2.4):

$$f_{\text{Э}}^{(v\pm)} = f_c \cdot \left(1 \pm v \cdot \frac{(1-s)}{p}\right) = f_c \pm v \cdot f_p.$$

Поиск нужной гармоники осуществляется в области поиска, при этом предполагается, что искомая гармоника имеет там максимальную амплитуду. Искомая ГЭР находится путем определения в области поиска частотной составляющей спектра с максимальной амплитудой (см. рис. 3.2).

Зависимость длины зоны поиска ГЭР  $\Delta f_{\text{диап.Э}}$  от числа пар полюсов  $p$  АД выглядит следующим образом:

$$\Delta f_{\text{диап.Э}} = \frac{f_c}{p} \cdot s_{\text{макс}} \cdot \quad (3.6)$$

Минимальное время записи сигнала  $T_{\text{зап.Э}}^{\text{мин}}$  при использовании ГЭР для определения значения скольжения можно рассчитать по следующему выражению [5, 95]:

$$T_{\text{зап.Э}}^{\text{мин}} = \frac{\varepsilon_{\text{макс}} \cdot s_m + 100 \cdot (1 + 2 \cdot p - s_m)}{2 \cdot \varepsilon_{\text{макс}} \cdot s_m \cdot f_c} \cdot \quad (3.7)$$

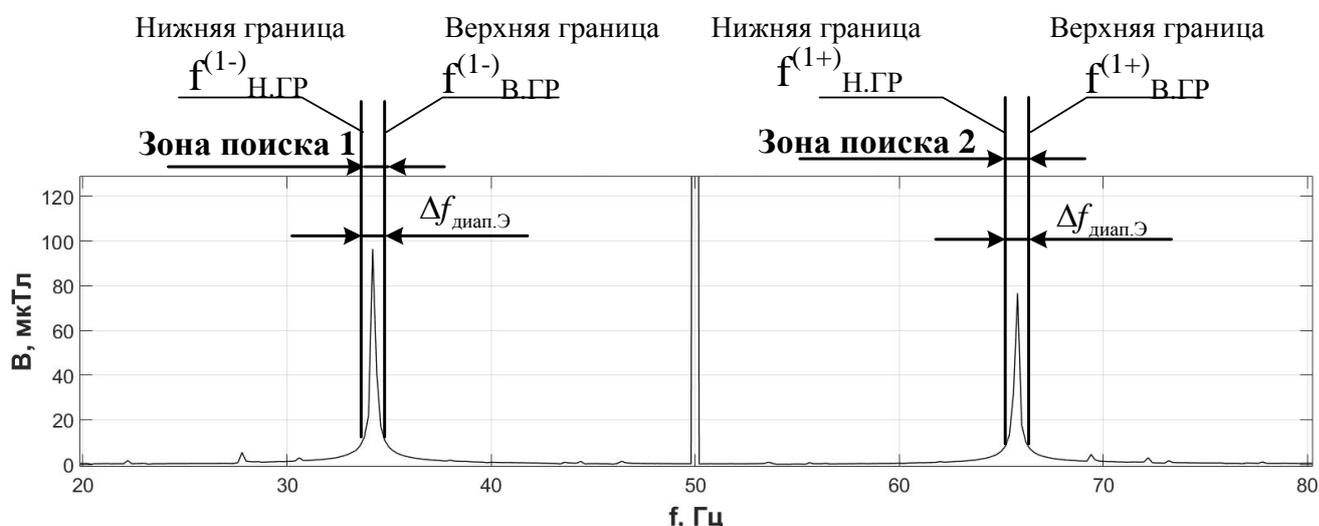


Рис. 3.2. Область поиска гармоник эксцентриситета ротора для АД №2

При числе пар полюсов  $p > 1$  скольжение определяется следующим образом. Сначала по формулам (3.8, 3.9) рассчитывается значение скольжения для правого и левого лепестка ГЭР, затем итоговое скольжение определяется как среднее арифметическое этих значений:

$$s_{\text{Э}}^{(1-)} = 1 - p + p \cdot f_{\text{Э}}^{(1-)} / f_c; \quad (3.8)$$

$$s_{\text{Э}}^{(1+)} = 1 + p - p \cdot f_{\text{Э}}^{(1+)} / f_c. \quad (3.9)$$

При  $p=1$  скольжение определяется только по выражению (3.9).

Данный способ имеет лишь один существенный недостаток – для обеспечения высокой точности определения скольжения необходима очень длительная запись сигнала (порядка нескольких минут).

В [5] утверждается, что ЗГР лучше подходят для определения значения скольжения, однако автор с этим не согласен.

В целях обоснования данной позиции проведен подробный сравнительный анализ способов определения скольжения по ЗГР и ГЭР. По формулам (3.2, 3.5, 3.7, 3.8) для двух двигателей с различными параметрами произведен расчет ширины зоны поиска и времени записи сигнала при определении скольжения по ЗГР и ГЭР, при этом было принято, что:

- частота сети  $f_c = 50$  Гц;
- максимальная погрешность определения скольжения  $\varepsilon_m = 5\%$ ;
- значение скольжения равно 10 % от номинального  $s = 0,1 \cdot s_{ном}$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 3.1. В таблице 3.2 указаны преимущества определения скольжения по ЗГР и ГЭР по отношению друг к другу.

Таблица 3.1. Значения ширины зоны поиска ЗГР и ГЭР в зависимости от параметров двигателя

Параметры двигателя	Число пар полюсов	Номинальное скольжение	Число стержней обмотки ротора
	1	0.04	19
Ширина зоны поиска ГЭР, Гц			3
Ширина зоны поиска ЗГР, Гц			57
Время записи сигнала при использовании ГЭР, с			150
Время записи сигнала при использовании ЗГР, с			55
Параметры двигателя	4	0,01	70
Ширина зоны поиска ГЭР, Гц			0,188
Ширина зоны поиска зубцовых гармоник ротора, Гц			13,2
Время записи сигнала при использовании ГЭР, с			1800
Время записи сигнала при использовании ЗГР, с			222

Таблица 3.2. Преимущества ЗГР и ГЭР относительно друг друга

Преимущества ЗГР	Преимущества ГЭР
1. Меньшее время записи сигнала (не превышает двух минут)	1. Не требуется информация о числе стержней обмотки ротора АД 2. Очень узкая частотная полоса, в которой могут находиться ГЭР, что обеспечивает лучшую помехозащищенность

Проанализировав информацию, представленную в табл. 3.1, 3.2 можно сделать вывод, что при определении скольжения единственным преимуществом ЗГР является меньшее время записи сигнала, по всем другим параметрам предпочтительнее использование ГЭР. При этом следует отметить тот факт, что с практической точки зрения время записи сигнала при использовании ЗГР так же является весьма значительным.

Таким образом, если отбросить время записи сигнала, как единственный показатель практической пригодности, то способ определения скольжения по ГЭР предпочтителен по критерию помехозащищенности. Поэтому к дальнейшей разработке принимаем способ определения скольжения по ГЭР.

### **3.3. Разработка метода автокоррекции времени записи сигнала**

Для точного определения амплитуд и частот с помощью обычного спектрального анализа, основанного на БПФ, требуется очень большое время записи сигнала, что неприемлемо с практической точки зрения.

ОПФ позволяет с довольно высокой точностью определять амплитуды гармонических составляющих даже при малом времени записи сигнала. Достигается это путём подавления боковых лепестков гармоник с большой

амплитудой, что значительно уменьшает влияние эффекта растекания спектра на гармониках с малыми амплитудами. Однако при использовании ОПФ значительно увеличивается ширина основного лепестка гармоник, что приводит к неправильному определению гармонических составляющих с малыми амплитудами, находящимися вблизи высокоамплитудных гармоник при малом времени записи сигнала. Кроме того, ОПФ никак не позволяет сократить время записи сигнала для уменьшения погрешности определения частоты.

Обычные методы спектрального анализа не способны с высокой точностью определять амплитуды и частоты гармонических составляющих спектра ВМП АД (в частности ГЭР) при малом времени записи сигнала, поэтому для создания эффективного анализатора спектра требуется решение данной проблемы.

Изучим влияние времени записи сигнала на точность определения частоты.

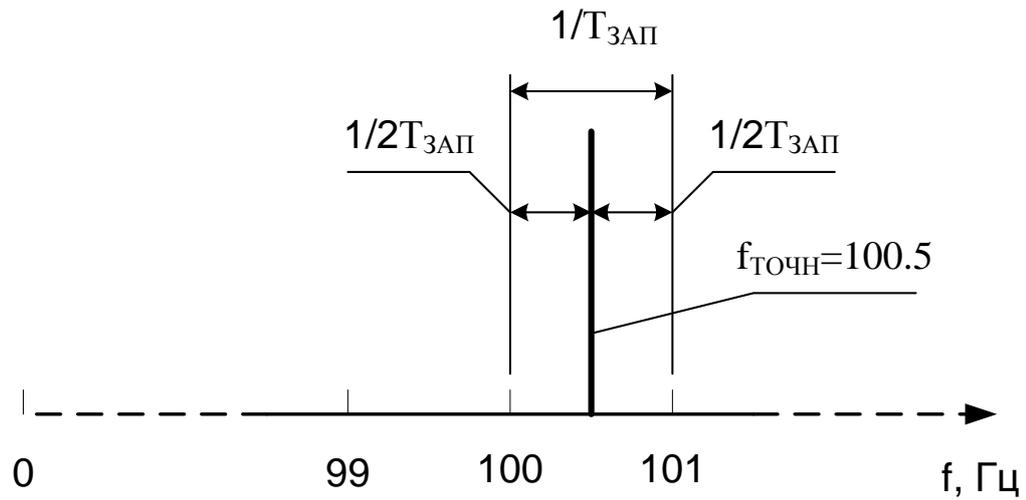
Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется периодический сигнал с частотой  $f_{\text{точн}}=100,5$  Гц. Время записи сигнала составляет  $T_{\text{зан}}=1$  с. Тогда шаг по частоте будет равен [91]

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{зан}}} = 1 \text{ Гц},$$

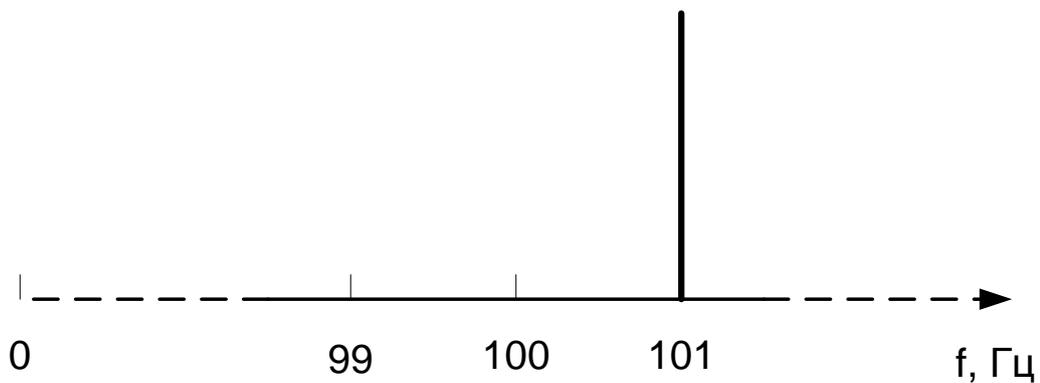
а максимальная погрешность при определении частоты составит:

$$\Delta f_{\text{макс}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{зан}}} = 0,5 \text{ Гц}.$$

Действительный спектр сигнала представлен на рис. 3.3, *а*. В данном случае точное значение частоты гармоники  $f_{\text{точн}}$  находится посередине между соседними отсчетами. Это означает, что значение частоты гармоники будет определено с максимальной погрешностью. На рис. 3.3, *б* показан спектр сигнала после быстрого преобразования Фурье. При этом значение частоты гармоники отличается от точного значения  $f_{\text{точн}}$  на величину погрешности.



а)



б)

Рис. 3.3. Влияние времени записи сигнала на погрешность определения частоты:  
 а – действительный спектр сигнала; б – спектр сигнала после быстрого преобразования Фурье

Увеличение времени записи сигнала приводит к тому, что шаг по частоте уменьшается и, соответственно, уменьшается максимальная погрешность. Однако данный подход неэффективен, так как зачастую, чтобы достичь необходимой точности при определении значения частоты требуется слишком большое время записи сигнала.

Предлагается пойти другим путем и вместо уменьшения шага по частоте подобрать время записи сигнала таким образом, чтобы частота искомой гармоники точно совпадала с границей отсчета. Однако, чтобы практически реализовать

данный подход нужно точно знать, минимальна ли погрешность определения частоты в данный момент?

Выясним, имеются ли отличительные признаки, с помощью которых можно характеризовать текущую величину погрешности определения частоты. Для изучения данного вопроса рассмотрим следующий пример.

Имеется периодический сигнал  $A(t)$  с частотой 100 Гц, определяемый следующим выражением (см. рис. 3.4)

$$A(t) = 5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 100 t),$$

частота дискретизации составляет  $F_d = 10$  кГц.

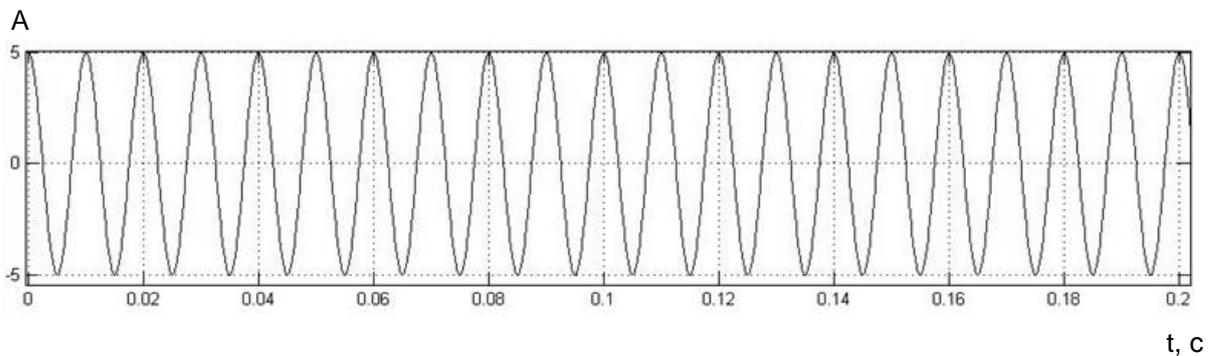


Рис. 3.4. Форма сигнала  $A(t)$

Результатом быстрого преобразования Фурье (БПФ) сигнала  $A(t)$  является спектральная функция  $S(\omega)$  следующего вида [91]:

$$S(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{-j\omega t}, \quad (3.10)$$

где  $\omega$  – частота;  $C_k$  – коэффициент ряда Фурье.

По сути, спектральная функция представляет собой ряд комплексных чисел. Чтобы получить амплитудный спектр сигнала  $A(t)$  необходимо совершить дополнительное преобразование. Амплитуда любой гармоники  $A_k$  связана с составляющей спектральной функции  $S_k$  следующим соотношением [91]:

$$A_k = \frac{2}{N_{OT}} \cdot \sqrt{(\operatorname{Re}(S_k))^2 + (\operatorname{Im}(S_k))^2}, \quad (3.11)$$

где  $N_{OT}$  – число отсчетов.

Число 2 в числителе выражения (3.11) учитывает мнимую часть спектра.

Изучим влияние времени записи на амплитудные спектры (далее просто спектры) сигнала  $A(t)$ . Рассмотрим следующие ситуации:

1. время записи сигнала  $T_{зан.1}=1,005$  с.

Погрешность определения частоты максимальна, то есть реальная частота сигнала  $A(t)$  располагается точно посередине между соседними отсчетами (см. рис. 3.5, а);

2. время записи сигнала  $T_{зан.2}=1,002$  с.

Погрешность определения частоты равна некоторому промежуточному значению (см. рис. 3.5, б);

3. время записи сигнала  $T_{зан.3}=1$  с.

Погрешность определения частоты равна нулю, то есть частота сигнала точно совпадает с границей отсчета (см. рис. 3.5, в);

4. время записи сигнала  $T_{зан.4}=0,998$  с.

При этом ситуация аналогична той, что описана в пункте 2 (см. рис. 3.5, г);

5. время записи сигнала  $T_{зан.5}=0,995$  с.

При этом ситуация аналогична той, что описана в пункте 1 (см. рис. 3.5, д).

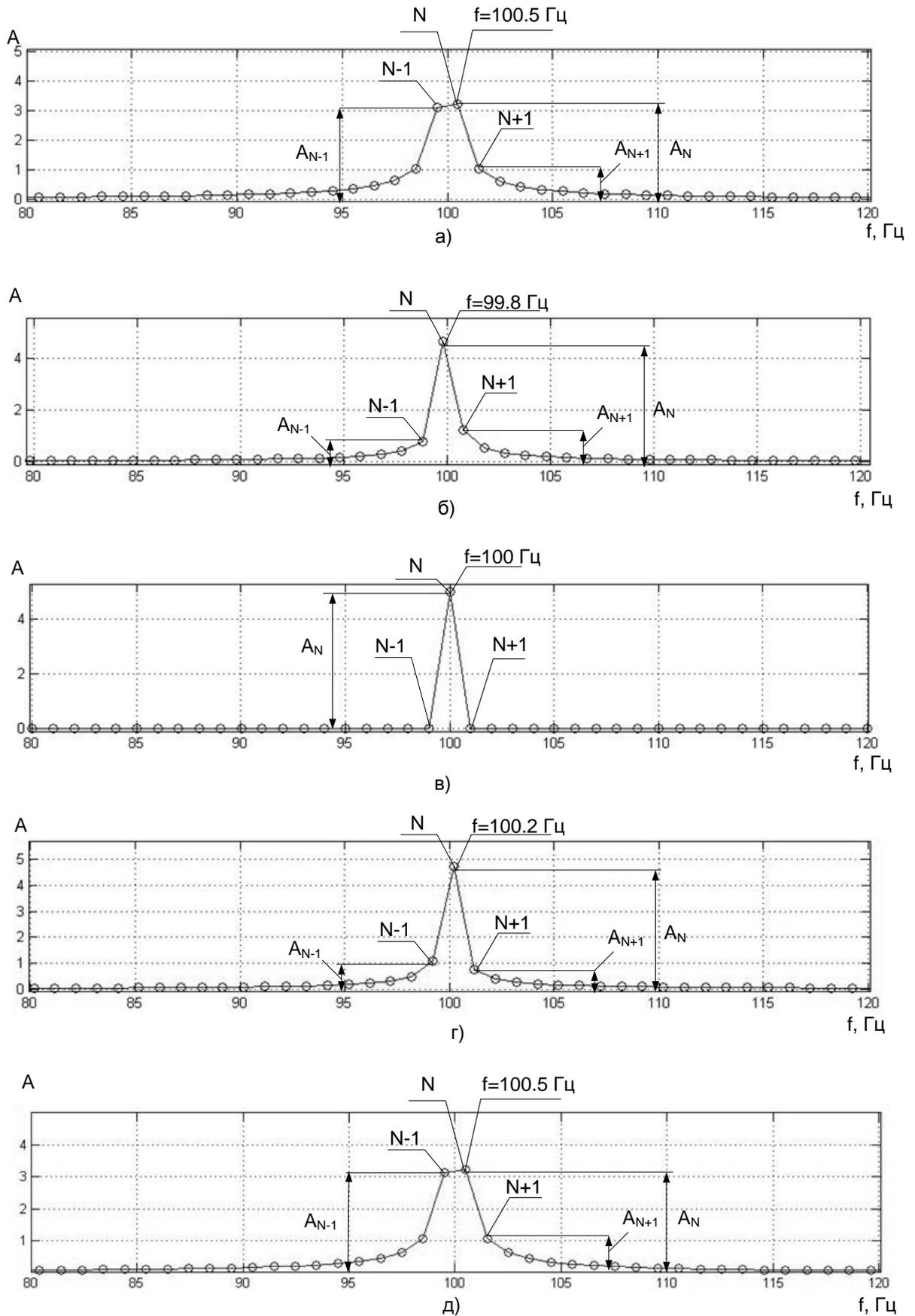


Рис. 3.5. Спектр сигнала  $A(t)$  при различном времени записи сигнала  $T_{зан}$ :

а –  $T_{зан.1} = 1,005$  с; б –  $T_{зан.2} = 1,002$  с; в –  $T_{зан.3} = 1$  с; г –  $T_{зан.4} = 0,998$  с; д –  $T_{зан.5} = 0,995$  с

На рис. 3.5,  $a-d$   $N$  – номер отсчета, соответствующий гармонике с максимальной амплитудой,  $N-1$  и  $N+1$  – номера отсчетов (номера гармоник) расположенных слева и справа от гармоники с максимальной амплитудой,  $A_N, A_{N-1}, A_{N+1}$  – амплитуды гармоник, соответствующих указанным отсчетам.

Проанализируем изменения спектра сигнала  $A(t)$  в зависимости от времени записи.

Исходный сигнал  $A(t)$  имеет всего одну гармонику с частотой 100 Гц, однако в спектре, который был получен при времени записи  $T_{зан.1}$  (см. рис. 3.5,  $a$ ), присутствует целый ряд ярко выраженных гармонических составляющих. Самым интересным является то, что наиболее сильно выраженная гармоника имеет частоту 100,5 Гц и амплитуду  $A_N=3,3$ , что никак не соответствует параметрам заданного сигнала (амплитуда заданного сигнала равна 5). Отклонение частоты сигнала от заданного значения вызвано погрешностью, о чем уже неоднократно говорилось выше. Значительное уменьшение величины амплитуды  $A_N$  относительно заданного значения и рост амплитуд других гармонических составляющих спектра вызван, так называемым, эффектом растекания спектра [91].

В спектре сигнала  $A(t)$ , полученном при времени записи  $T_{зан.2}$  (см. рис. 3.5,  $b$ ), так же присутствует несколько выраженных гармонических составляющих, однако их амплитуды меньше чем на рис. 3.5,  $a$ . Наиболее сильно выраженная гармоника имеет частоту 99,8 Гц и амплитуду  $A_N=4,3$ , что значительно ближе к параметрам заданного сигнала. При времени записи  $T_{зан.2}$  отклонение частоты сигнала от заданного значения уменьшилось, значение амплитуды  $A_N$  увеличилось, а амплитуды посторонних гармоник наоборот уменьшились. Таким образом, при времени записи  $T_{зан.2}$  эффект растекания спектра меньше, чем при времени  $T_{зан.1}$ .

Спектр сигнала  $A(t)$ , который был получен при времени записи  $T_{зан.3}$  (см. рис. 3.5,  $в$ ), имеет одну ярко выраженную гармонику с частотой равной 100 Гц и амплитудой  $A_N=5$ , что полностью соответствует характеристикам заданного сигнала. В данном случае эффект растекания спектра полностью отсутствует.

Спектры сигнала  $A(t)$ , которые были получены при времени записи  $T_{зан.4}$  и  $T_{зан.5}$  (см. рис. 3.5,  $z, d$ ) соответствуют спектрам, полученным при времени записи сигнала  $T_{зан.2}$  и  $T_{зан.1}$ , соответственно.

На основании проанализированной информации можно сделать вывод, что **увеличение погрешности определения частоты приводит к усилению эффекта растекания спектра и наоборот, чем меньше погрешность, тем слабее эффект растекания. Данную зависимость можно использовать для оценки величины погрешности определения частоты.**

Так же можно отметить цикличность изменения погрешности определения частоты при последовательном изменении времени записи сигнала. Последовательно уменьшая время записи сигнала с  $T_{зан.1}$ , при котором погрешность была максимальна, сначала наблюдалось уменьшение погрешности вплоть до времени  $T_{зан.3}$ , а затем вплоть до времени  $T_{зан.5}$  происходил рост величины погрешности. **Период изменения величины погрешности определения частоты (эффекта растекания спектра) равен периоду сигнала.** Таким образом, чтобы добиться минимизации погрешности определения частоты не требуется значительного изменения времени записи сигнала.

Подбор оптимального времени записи сигнала может осуществляться согласно следующему выражению:

$$T_{зан.i} = T_{зан} - i \cdot \frac{1}{F_d}, \quad (3.12)$$

где  $T_{зан.i}$  – время записи сигнала после  $i$ -го количества шагов уменьшения времени записи сигнала с исходного значения  $T_{зан}$ .

На каждом шаге уменьшения времени записи сигнала необходима оценка величины растекания спектра.

Определим критерии оценки величины растекания спектра.

В ходе анализа рис. 3.5 была отмечена закономерность изменения амплитуд гармонических составляющих сигнала  $A(t)$ , в зависимости от величины растекания спектра (и соответственно от величины погрешности определения частоты). С

уменьшением эффекта растекания спектра значение амплитуды  $A_N$  увеличивается, а значение амплитуд  $A_{N-1}$ ,  $A_{N+1}$  – уменьшается (значения амплитуд других гармоник также уменьшаются, однако нас интересуют именно  $N-1$  и  $N+1$  гармоники). Исходя из этой информации требуется надежный критерий, который учитывал бы, с одной стороны, максимальное значение амплитуды  $A_N$ , а, с другой стороны, минимум амплитуд соседних гармонических составляющих  $A_{N-1}$ ,  $A_{N+1}$ . В качестве такого критерия предлагается параметр  $V$ , определяемый следующим образом

$$V = (A_N - A_{N-1}) \cdot (A_N - A_{N+1}). \quad (3.13)$$

Определим при какой величине параметра  $V$  эффект растекания спектра будет минимален. Рассмотрим рис. 3.6, на котором показана зависимость частоты  $N$ -ой гармоники от номера шага уменьшения времени записи сигнала  $i$  и рис. 3.7, на котором показана зависимость параметра  $V$  от номера шага уменьшения времени записи сигнала  $i$ .

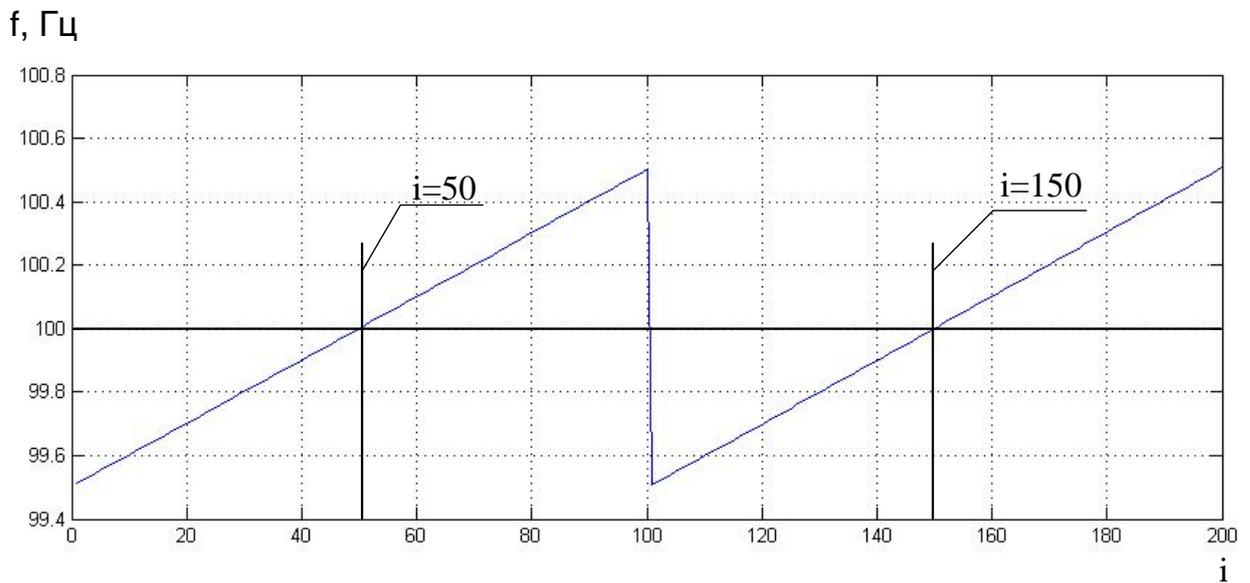


Рис. 3.6. Зависимость частоты  $N$ -ой гармоники от номера шага уменьшения времени записи сигнала  $i$

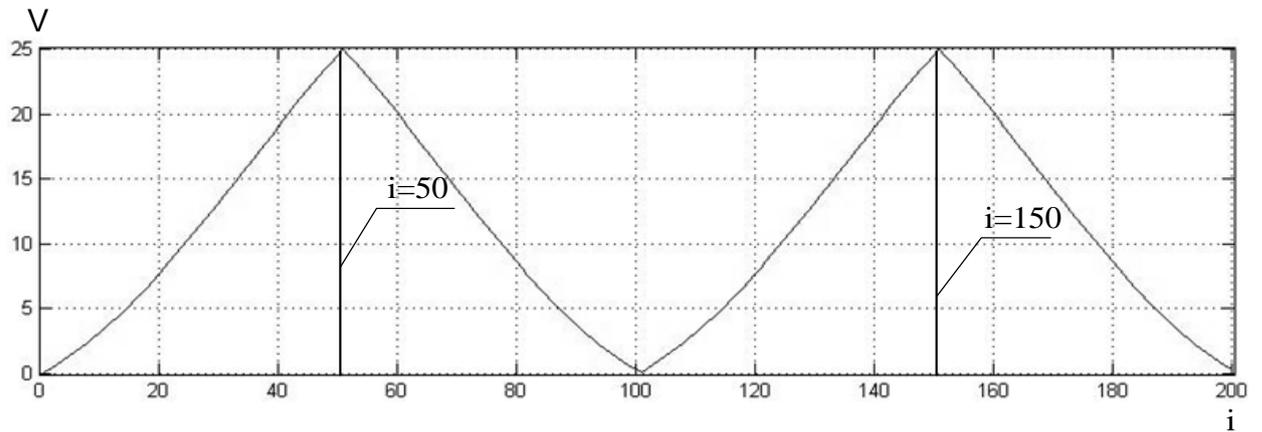


Рис. 3.7. Зависимость величины  $V$  от номера шага уменьшения времени записи сигнала  $i$

Частота  $N$ -ой гармоники совпадает с частотой сигнала  $A(t)$ , равной  $f=100$  Гц на 50 и 150 итерации (см. рис. 3.6), при этом величина  $V$  достигает своих максимальных значений (см. рис. 3.7). Таким образом, **эффект растекания спектра будет минимален при максимальном значении параметра  $V$** , то есть:

$$V = (A_N - A_{N-1}) \cdot (A_N - A_{N+1}) = \max. \quad (3.14)$$

Если условие (3.14) выполняется, то можно говорить о том, что погрешность определения частоты и амплитуды гармоники минимальна.

На основе полученных результатов разработан алгоритм **автокоррекции времени записи сигнала** (АВЗС), позволяющий подобрать для любой гармонической составляющей спектра оптимальное время записи сигнала, при котором погрешность определения частоты и амплитуды минимальна. При этом оконное сглаживание не используется, то есть в качестве оконной функции применяется обычное прямоугольное окно.

Структурная схема алгоритма автокоррекции времени записи сигнала представлена на рис. 3.8.

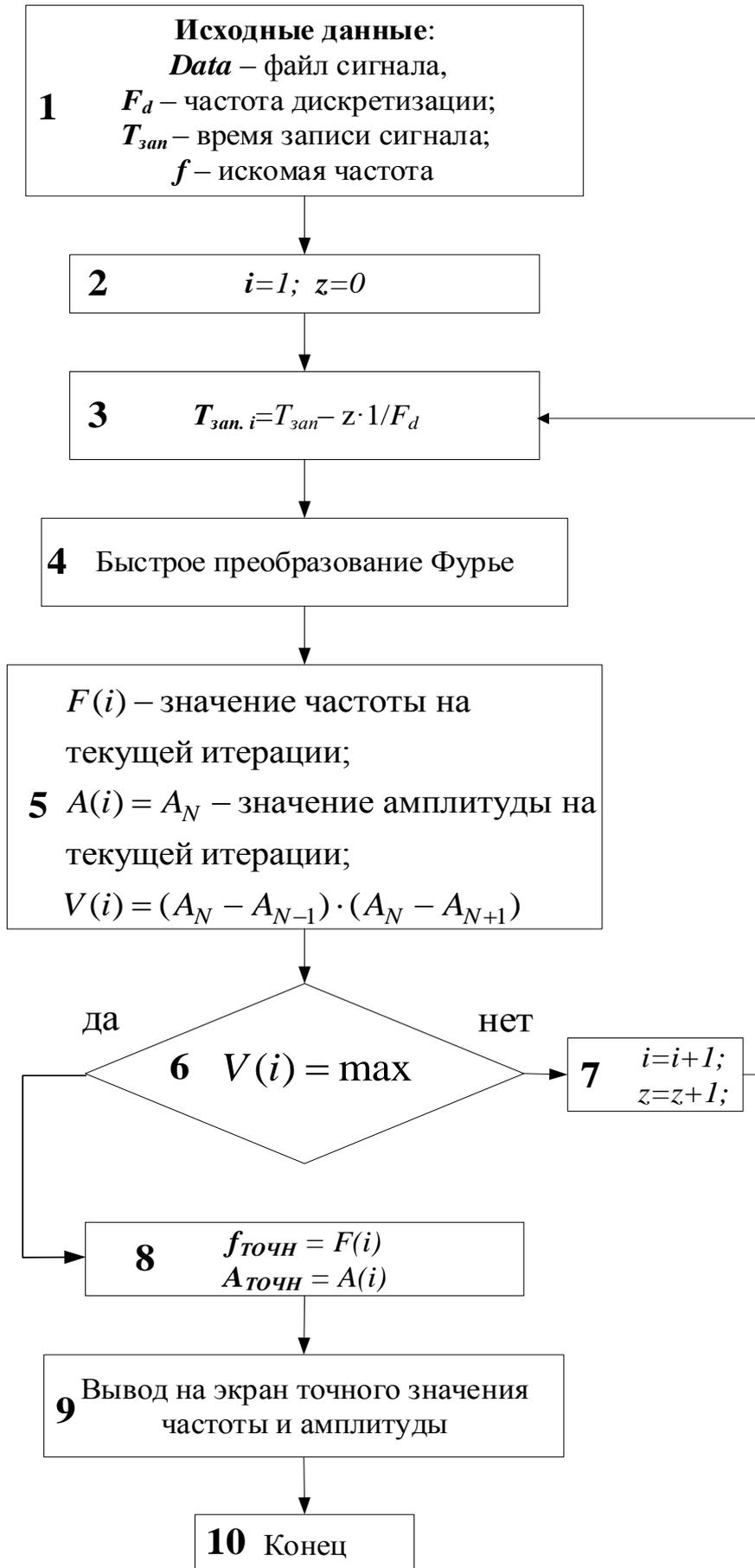


Рис. 3.8. Структурная схема алгоритма АВЗС

### 3.4. Определение методической погрешности определения частоты с помощью автокоррекции времени записи сигнала

Для того чтобы понять, каким образом алгоритм АВЗС влияет на значение частот гармонических составляющих спектра, рассмотрим следующий пример. Пусть имеется периодический сигнал с частотой  $f$ , с временем записи  $T_{зан}$  и частотой дискретизации АЦП  $F_d$ .

Теперь рассмотрим работу алгоритма АВЗС (рис 3.9).

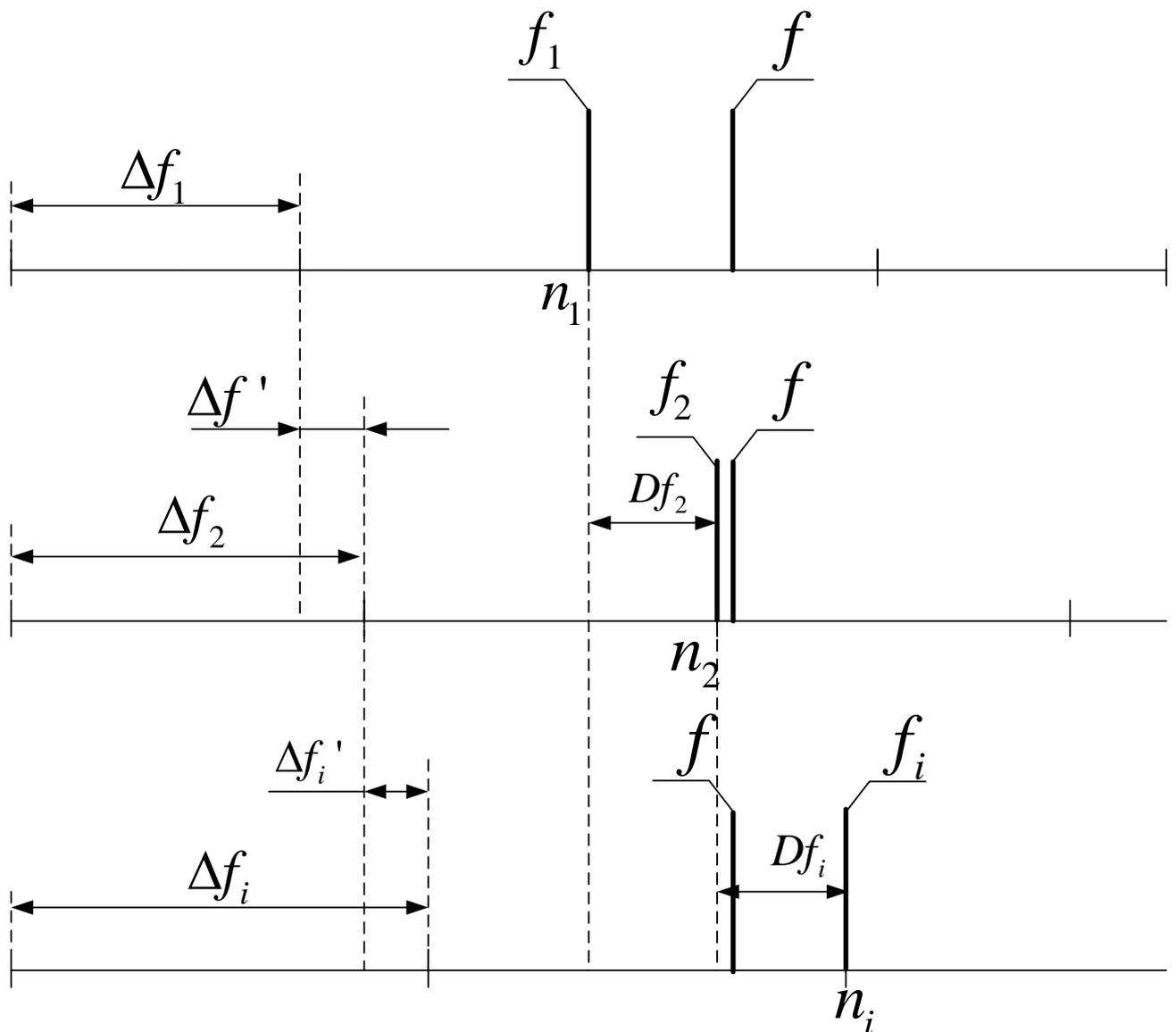


Рис. 3.9. Зависимость частоты от времени записи сигнала

На первой итерации (рис 3.9, верхний график) шаг по частоте будет равен:

$$\Delta f_1 = \frac{1}{T_{зан}}. \quad (3.15)$$

Тогда значение частоты гармоники будет равно:

$$f_1 = n_1 \cdot \Delta f_1, \quad (3.16)$$

где  $n_1 = \frac{f_1}{\Delta f_1} = f_1 \cdot T_{зан}$  – число шагов.

На второй итерации (см. рис 3.9, средний график) и на последующих происходит уменьшение времени записи сигнала на величину, которая равна:

$$\Delta T_{зан} = \frac{1}{F_d}. \quad (3.17)$$

Время записи сигнала на  $i$ -ой итерации (см. рис 3.9, нижний график) будет определяться следующим образом:

$$T_{зан.i} = T_{зан} - i \cdot \Delta T_{зан} = T_{зан} - \frac{i}{F_d}. \quad (3.18)$$

Частота гармоники на  $i$ -ой итерации будет равна:

$$f_i = n_i \cdot \Delta f_i, \quad (3.19)$$

где

$$n_i = f_i \cdot T_{зан.i}; \quad (3.20)$$

$$\Delta f_i = \frac{1}{T_{зан} - \frac{i}{F_d}}. \quad (3.21)$$

Тогда разницу значений частот гармонической составляющей  $Df_i$  между  $i$ -ой и  $(i-1)$ -ой итерациями можно будет определить следующим образом:

$$Df_i = f_i - f_{i-1} = n_i \cdot \Delta f_i - n_{i-1} \cdot \Delta f_{i-1}. \quad (3.22)$$

Ввиду того, что шаг по времени сигнала  $\Delta T_{зан}$  много меньше времени записи сигнала  $T_{зан}$ , то можно принять, что в процессе АВЗС число шагов  $n$  по частоте не изменяется, то есть

$$n_1 = n_2 = n_{i-1} = n_i. \quad (3.23)$$

Тогда

$$Df_i = n_i \cdot \Delta f_i', \quad (3.24)$$

где  $\Delta f_i'$  – изменение шага по частоте между  $i$ -ой текущей и  $(i-1)$ -ой итерациями.

$$\Delta f_i' = \Delta f_i - \Delta f_{i-1} = \frac{1}{T_{зан} - \frac{i}{F_d}} - \frac{1}{T_{зан} - \frac{i-1}{F_d}}; \quad (3.25)$$

или

$$\Delta f_i' = \frac{F_d}{(F_d \cdot T_{зан} - i) \cdot (F_d \cdot T_{зан} - i + 1)}. \quad (3.26)$$

Подставив в выражение (3.24) выражения (3.20) и (3.26) получим:

$$Df_i = \frac{f_i \cdot T_{зан.i} \cdot F_d}{(F_d \cdot T_{зан} - i) \cdot (F_d \cdot T_{зан} - i + 1)}. \quad (3.27)$$

Тогда окончательно разница частот гармонической составляющей  $Df_i$  между  $i$ -ой и  $(i-1)$ -ой итерациями будет определяться следующим выражением

$$Df_i = \frac{f_i}{F_d \cdot T_{зан} - i + 1}. \quad (3.28)$$

Максимальная погрешность определения частоты  $\Delta f_m$  при использовании алгоритма АВЗС будет определяться следующим образом:

$$\Delta f_m = \frac{Df_i}{2}; \quad (3.29)$$

или

$$\Delta f_m = \frac{f_i}{2 \cdot (F_d \cdot T_{зан} - i + 1)}. \quad (3.30)$$

Проанализируем выражение (3.31). **Максимальная погрешность определения частоты  $\Delta f_m$  при использовании алгоритма АВЗС зависит не только от времени записи сигнала, но и от частоты дискретизации.** Так как современные АЦП могут работать при частоте, лежащей в области МГц, то **уменьшать погрешность определения частоты следует за счет увеличения частоты дискретизации, а не за счет увеличения времени записи сигнала.** Время записи сигнала при этом следует выбирать исходя из соображений минимально допустимого разрешения по частоте.

Минимальное число итераций  $N_{ит.мин}$ , необходимое для определения точных значений частоты и амплитуды можно определить по следующему выражению:

$$N_{ит.мин} = \frac{F_d}{f_{прибл}} + 1, \quad (3.31)$$

где  $f_{прибл}$  – приблизительное (предполагаемое) значение измеряемой частоты

### **3.5. Определение критериев достоверности определения скольжения по гармоникам эксцентриситета ротора**

Для получения корректных результатов спектрального анализа необходим качественный сигнал. Математический аппарат, основанный на преобразовании Фурье, требует использования стационарных сигналов, параметры которых не изменяются во времени. В условия реальной эксплуатации в процессе регистрации ВМП может произойти изменение нагрузки АД, смещение датчика и т.п., что приведет к увеличению нестационарности (снижению качества) сигнала.

Использование некачественного сигнала может привести к некорректным результатам спектрального анализа и, в конечном итоге, к ошибочным результатам диагностирования АД. Во избежание такой ситуации необходимы критерии, которые бы позволяли оценить качество (пригодность) зарегистрированного сигнала.

В качестве такого критерия предлагается правильность определения скольжения АД. Логика данного предложения заключается в том, что если скольжение по ГЭР 1-го порядка будет определено с допустимой погрешностью, то можно сделать вывод, что сигнал пригоден к использованию, в противном случае необходимо повторить регистрацию сигнала.

Однако теперь встает вопрос о том, как проверить правильность определения скольжения? Каждый раз сравнивать результат определения скольжения по ГЭР с показателями какого-либо эталонного прибора является бессмысленным, поэтому искомый критерий должен определяться непосредственно из зарегистрированного сигнала.

Рассмотрим подробнее вопрос определения скольжения по ГЭР 1-го порядка с применением АВЗС.

Частоты гармоник первого порядка, вызванных наличием динамического эксцентриситета в воздушном зазоре АД с числом пар полюсов  $p > 1$  согласно (2.4) можно определить по формуле

$$f_{\text{Э.м}}^{1\pm} = f_{c.m} \cdot \left( 1 \pm \frac{(1-s)}{p} \right), \quad (3.32)$$

где  $f_{\text{Э.м}}^{1\pm}$  – точное значение частот ГЭР первого порядка;  $f_{c.m}$  – точное значение частоты сети.

Для двигателей с числом пар полюсов  $p = 1$ :

$$f_{\text{Э.м}}^{1+} = f_{c.m} \cdot \left( 1 + \frac{(1-s)}{p} \right). \quad (3.33)$$

Максимальная частота при использовании для контроля скольжения ГЭР:

$$f_{\text{макс.}\mathcal{E}} = \left( f_{\mathcal{E}.m}^{(1+)}(s=0) = f_{c.m} + \frac{f_{c.m}}{p} \right). \quad (3.34)$$

Тогда минимальная частота дискретизации АЦП при использовании для контроля скольжения ГЭР равна:

$$f_{\text{АЦП}}^{\text{мин}} = 2 \cdot \left( f_{c.m} + \frac{f_{c.m}}{p} \right). \quad (3.35)$$

Определим максимальную погрешность по скольжению для ГЭР первого порядка. Для этого рассмотрим два случая. В первом случае скольжение определяется по правому лепестку ГЭР ( $f_{\mathcal{E}.m}^{1+}$ ), а во втором – по левому ( $f_{\mathcal{E}.m}^{1-}$ ).

Для ГЭР 1-го порядка точные значения скольжения могут быть определены по выражениям:

$$s_{\text{ГДЭ}.m}^{1+} = 1 - \frac{p(f_{\mathcal{E}.m}^{1+} - f_{c.m})}{f_{c.m}}; \quad (3.36)$$

$$s_{\text{ГЭР}.m}^{1-} = 1 - \frac{p(f_{c.m} - f_{\text{ГДЭ}.m}^{1-})}{f_{c.m}},$$

где  $f_{\mathcal{E}.m}^{1+}$  – точное значение частот ГЭР 1-го порядка;  $f_{c.m}$  – точное значение частоты сети.

Измеренные значения скольжений по ГЭР 1-го порядка составляют:

$$s_{\mathcal{E}.изм}^{1+} = (1+p) - \frac{p(f_{\mathcal{E}.m}^{1+} \pm \Delta f_{\mathcal{E}}^{1+})}{f_{c.m} \pm \Delta f_c}; \quad (3.37)$$

$$s_{\mathcal{E}.изм}^{1-} = (1-p) + \frac{p(f_{\mathcal{E}.m}^{1-} \pm \Delta f_{\mathcal{E}}^{1-})}{f_{c.m} \pm \Delta f_c}. \quad (3.38)$$

В этих выражениях погрешности определения частоты сети  $\Delta f_c$  и частот ГЭР 1-го порядка  $\Delta f_{\mathcal{E}}^{1\pm}$  с применением метода АВЗС могут быть определены по выражениям:

$$\begin{cases} \Delta f_c = \frac{f_{c.изм}}{2(T_{зан} F_d - i_c + 1)}; \\ \Delta f_{\mathcal{E}}^{1-} = \frac{f_{\mathcal{E}.изм}^{1-}}{2(T_{зан} F_d - i_{\mathcal{E}}^{1-} + 1)}; \\ \Delta f_{\mathcal{E}}^{1+} = \frac{f_{\mathcal{E}.изм}^{1+}}{2(T_{зан} F_d - i_{\mathcal{E}}^{1+} + 1)}, \end{cases} \quad (3.39)$$

где  $i_c$  – количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при определении частоты сети;  $i_{\mathcal{E}}^{1+}$  – количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при определении большей из двух частот ГЭР 1-го порядка ( $f_{\mathcal{E}}^{1+}$ );  $i_{\mathcal{E}}^{1-}$  – количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при определении меньшей из двух частот ГЭР 1-го порядка ( $f_{\mathcal{E}}^{1-}$ ).

Проанализировав выражения (3.37, 3.38), можно сделать вывод, что наибольшие погрешности определения скольжения по каждой из частот ГЭР 1-го порядка возникают, когда погрешности определения частот ГЭР складываются, а погрешности определения частоты сети вычитаются. С учетом этого факта формулы для нахождения данных параметров имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta s_{\mathcal{E}.макс}^{1+} = \Delta s_{\mathcal{E}.3}^{1+} = p \frac{(f_{\mathcal{E}.м}^{1+} \Delta f_c + f_{c.м} \Delta f_{\mathcal{E}}^{1+})}{f_{c.м} (f_{c.м} - \Delta f_c)}; \\ \Delta s_{\mathcal{E}.макс}^{1-} = p \frac{(f_{\mathcal{E}.м}^{1-} \Delta f_c + f_{c.м} \Delta f_{\mathcal{E}}^{1-})}{f_{c.м} (f_{c.м} - \Delta f_c)}. \end{cases} \quad (3.40)$$

Очевидно, что максимально возможная разность между значениями скольжений, определенных по частотам ГЭР 1-го порядка, может быть оценена как сумма двух погрешностей, определяемых по выражениям (3.40). После математических преобразований с учетом того, что сумма частот ГЭР 1-го порядка всегда равна удвоенному значению частоты сети:

$$f_{\mathcal{E}.м}^{1+} + f_{\mathcal{E}.м}^{1-} = 2 f_{c.м}, \quad (3.41)$$

получим окончательное выражение для определения максимально возможной разности скольжений, определенных по частотам  $f_{\mathcal{E}.м}^{1-}$  и  $f_{\mathcal{E}.м}^{1+}$ :

$$\Delta s_{ГЭР.макс} = \Delta s_{ГЭР.макс}^{I+} - \Delta s_{ГЭР.макс}^{I-} = \frac{P}{(f_{c.m} - \Delta f_c)} (\Delta f_c \cdot 2 + \Delta f_{ГЭР}^{I+} + \Delta f_{ГЭР}^{I-}). \quad (3.42)$$

Тогда итоговое выражение для оценки достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора будет выглядеть следующим образом:

$$|s_{\Delta.изм}^{1+} - s_{\Delta.изм}^{1-}| \leq \frac{p(\Delta f_c \cdot 2 + \Delta f_{\Delta}^{1+} + \Delta f_{\Delta}^{1-})}{(f_{c.m} - \Delta f_c)}. \quad (3.43)$$

В левой части выражения (3.43) рассчитывается разница между скольжениями, измеренными по частотам ГЭР 1-го порядка в ходе контроля, а в правой – максимально допустимая разница между этими скольжениями. При этом значения погрешностей определения частот рассчитываются по выражению (3.39), а точное значение частоты сети при достаточно больших величинах произведения частоты дискретизации  $F_d$  и времени записи сигнала  $T_{зап}$  (порядка 1000 и более) и малой величине допустимого отклонения частоты сети от номинального в нормальном режиме ( $\pm 0,2$  Гц) [92] можно принять равным 50 Гц.

В установившемся режиме скольжение даже неисправного двигателя не может превышать удвоенной величины номинального скольжения машины:

$$s_{изм} \leq 2 \cdot s_{ном}. \quad (3.44)$$

Поэтому неравенство (3.44) принято в качестве дополнительного критерия для оценки достоверности определения скольжения.

Таким образом, в случае выполнения условий (3.43, 3.44) полученное значение скольжения можно считать верным, а зарегистрированный сигнал пригодным к дальнейшему анализу.

### **3.6. Анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала**

На основании произведенных исследований, на базе АВЗС был разработан анализатор спектра, структурная схема которого представлена на рис. 3.10.

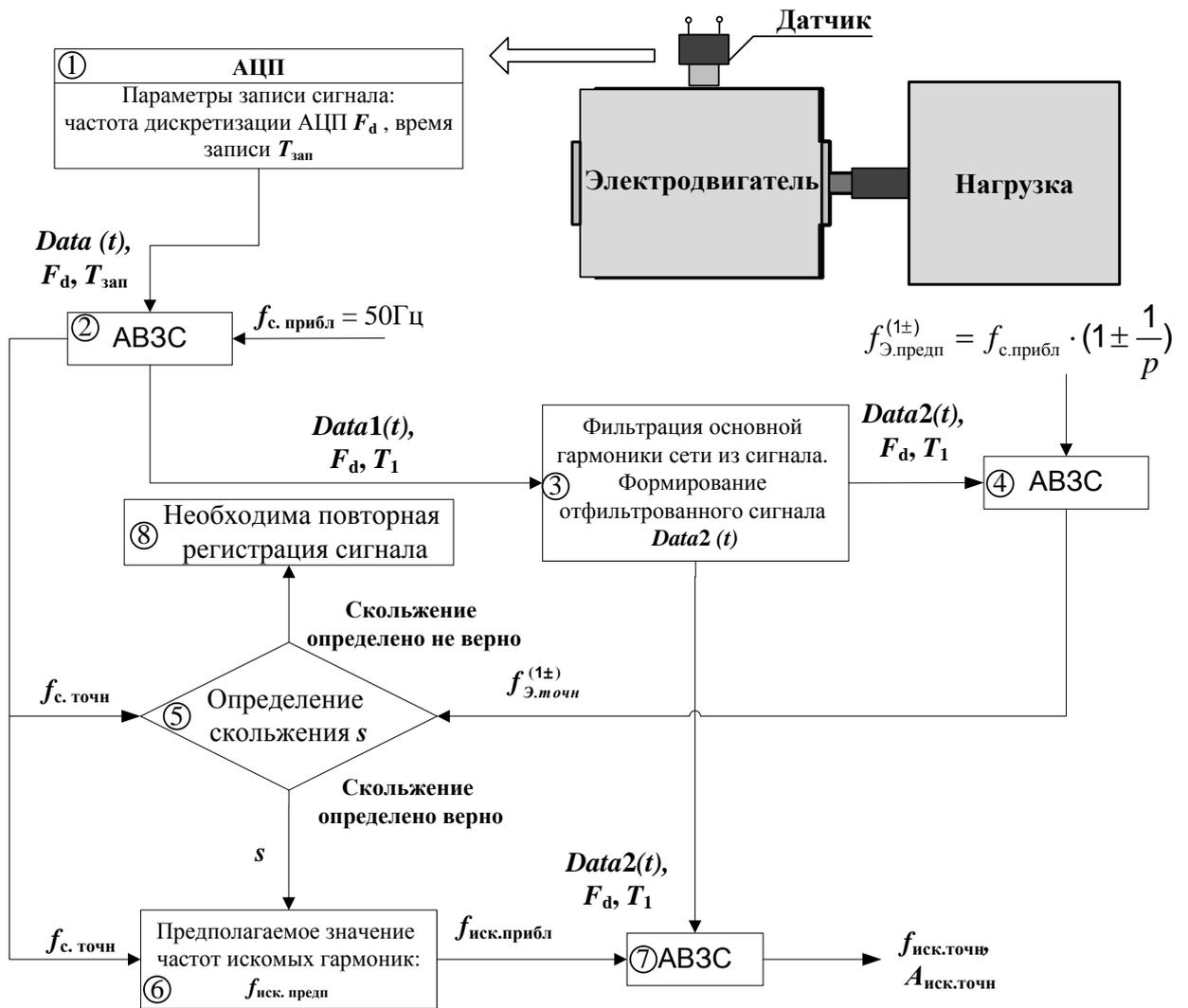


Рис. 3.10. Структурная схема анализатора спектра на базе АВЗС

Принцип действия разработанного анализатора заключается в выполнении следующих операций:

1) Преобразование зарегистрированного аналогового сигнала в цифровой  $Data$  (блок 1). Сигналом может служить ток статора, внешнее или внутренне магнитное поле и т.п. (блок 1).

2) Определение с помощью АВЗС точного значения частоты сети, предварительно задавая приблизительное значение частоты сети 50 Гц для определения необходимого числа итераций (блок 2). При этом в результате работы алгоритма мы получаем сигнал  $Data1$  с меньшим временем записи  $T_1$ .

3) Для устранения влияния на амплитуды информативных гармонических составляющих спектра основной гармоники сети применяется процедура цифровой фильтрации сигнала, в процессе которой из сигнала *Data1* эта гармоника удаляется (блок 3). При необходимости могут удаляться и другие мощные гармоники (например, гармоники, кратные частоте сети).

Это реализовано следующим образом. Из спектра сигнала длительностью  $T_1$ , при котором амплитуда основной гармоники сети будет максимальна, данная гармоника удаляется. Данная процедура позволяет наиболее полно отфильтровать необходимые гармоники сигнала, минимизировав при этом влияние на другие гармоники. После этого, с помощью обратного преобразования Фурье формируется отфильтрованный сигнал *Data2* той же длительности  $T_1$ , который и подвергают дальнейшему спектральному анализу.

4) Определение скольжения (блок 5) АД производится по ГЭР 1-го порядка. Суть способа состоит в следующем. По полученному значению частоты сети и числу пар полюсов электродвигателя вычисляют приблизительные значения частот гармоник эксцентриситета ротора первого порядка  $f_{\text{Э.прибл}}^{(1\pm)}$ , а также границы зон поиска данных гармоник, по максимуму амплитуд внутри зон поиска находят гармоники эксцентриситета ротора первого порядка и с помощью алгоритма АВЗС определяют точные значения их частот  $f_{\text{Э.точн}}^{(1\pm)}$  (блок 4). Далее, по определенным значениям этих частот и точному значению частоты сети вычисляют скольжение электродвигателя  $s$  (блок 5), если при этом не выполняются критерии правильности определения скольжения, определенные по выражениям (3.43) и (3.44), то работа алгоритма прекращается и предлагается повторить регистрацию сигнала (блок 8).

5) Определение точных значений амплитуд и частот искомым гармоник. Зная скольжение двигателя и точное значение частоты сети, можно оценить приблизительные значения частот любых интересующих нас гармоник  $f_{\text{иск.прибл}}$  (блок 6) и по методу АВЗС в спектре сигнала *Data2* определить точные значения их амплитуд и частот  $f_{\text{иск.точн}}$ ,  $A_{\text{иск.точн}}$  (блок 7).

Благодаря использованию АВЗС и фильтрации мощных гармоник, которые не несут информацию о повреждении узлов электродвигателя, а также проверки достоверности определения скольжения, разработанный алгоритм позволяет автоматически производить обработку сигнала и с достаточной точностью определять частоты и амплитуды любой гармонической составляющей сигнала даже при времени записи сигнала порядка 1–3 сек.

Корректность работы анализатора спектра проверялась с помощью виртуальных сигналов, полученных в ходе компьютерного моделирования в главе 2. В качестве объекта испытания была использована модель АД №1 с 1 парой полюсов и одним повреждённым стержнем обмотки ротора. В качестве исследуемого сигнала использован виртуальный сигнал с датчика ВИД.

В процессе спектрального анализа этого сигнала разработанным анализатором спектра были определены амплитуды и частоты основной гармоники сети, ГЭР 1-го порядка и гармоник ФОР. Далее по полученным значениям частот и амплитуд гармоник, с помощью обратного преобразования Фурье, был сгенерирован искусственный сигнал (тест-сигнал), имитирующий реальный, состоящий только из этих гармоник. В дальнейшем с помощью разработанного алгоритма и с помощью традиционных БПФ и ОПФ были проведены обработка тест-сигнала и сравнение полученных амплитуд гармоник с их реальными значениями.

В табл. 3.3 представлены действительные значения частот и амплитуд гармоник тест-сигнала, которые требовалось определить.

Таблица 3.3. Параметры тест-сигнала

Номера гармоник	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота, Гц	47,8	49,99	96,7	98,9	145,7	147,8	194,6	196,7	243,5	245,6
Амплитуда, мВ	0,62	172,9	6,045	13,463	6,141	5,991	5,606	4,737	4,248	1,98

В табл. 3.4–3.7 и на рис. 3.11–3.14 показаны результаты определения амплитуд при времени записи сигнала от 2 до 30 с. с помощью обычного БПФ, с

помощью ОПФ при использовании окон Ханна (окно высокого разрешения) и Флэттоп (окно низкого разрешения) и с помощью разработанного анализатора спектра.

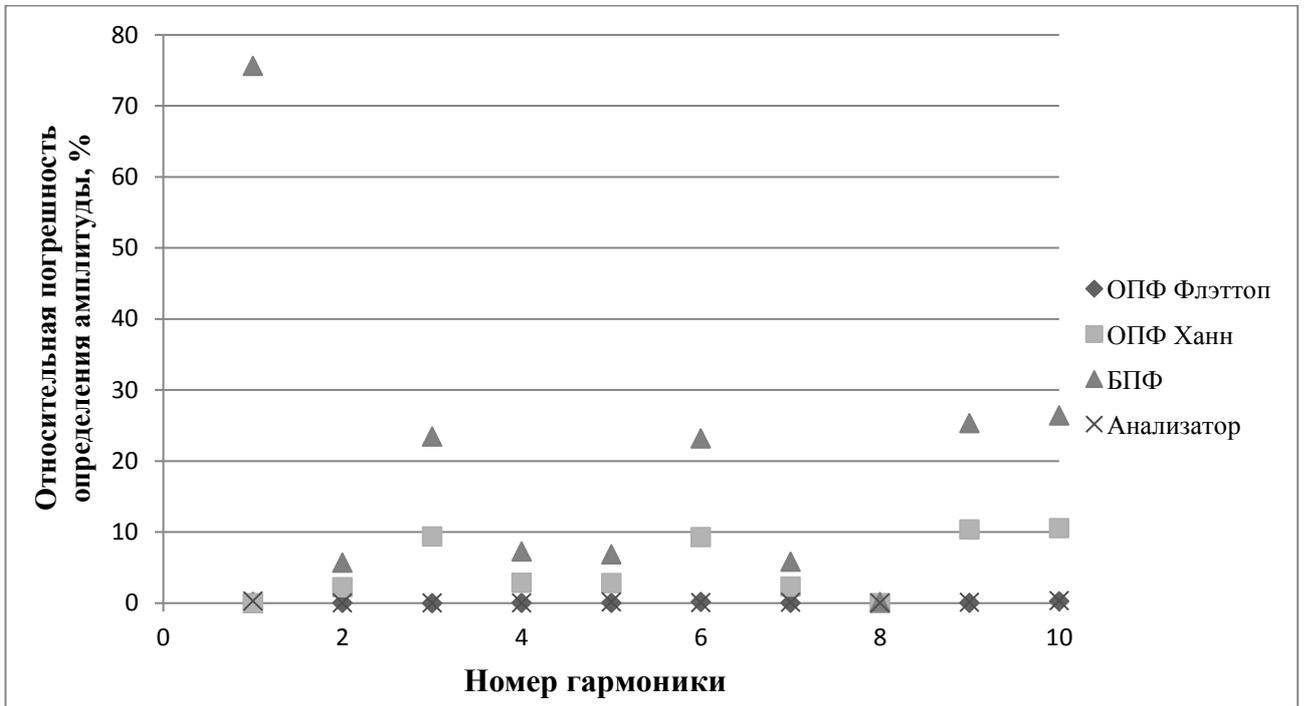


Рис. 3.11. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи 30 с

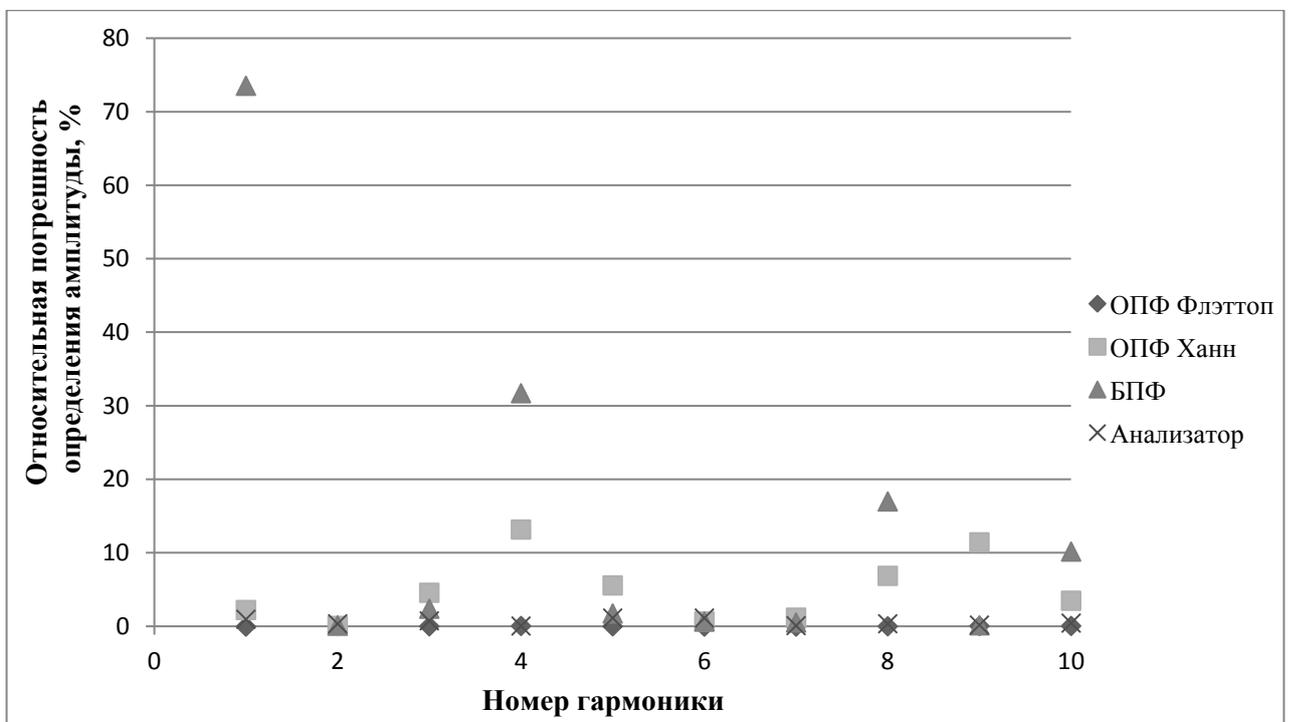


Рис. 3.12. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи 5 с

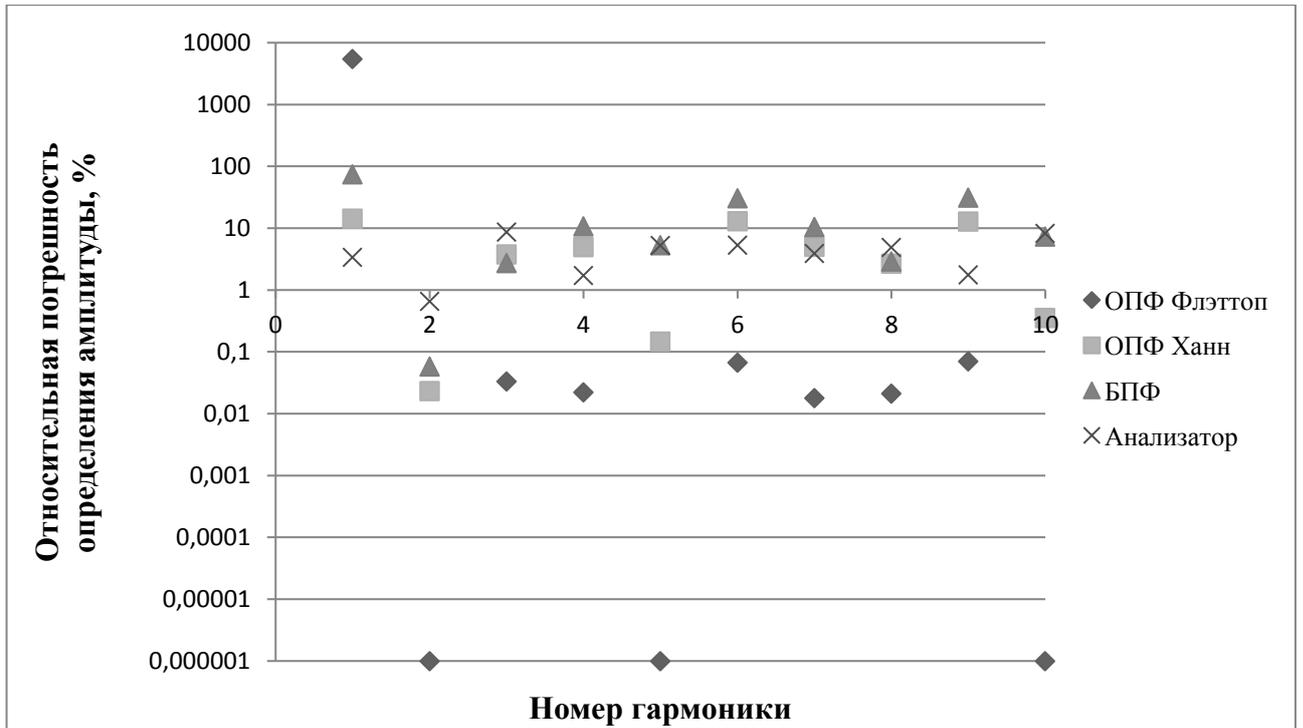


Рис. 3.13. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи 3 с (график в логарифмическом масштабе)

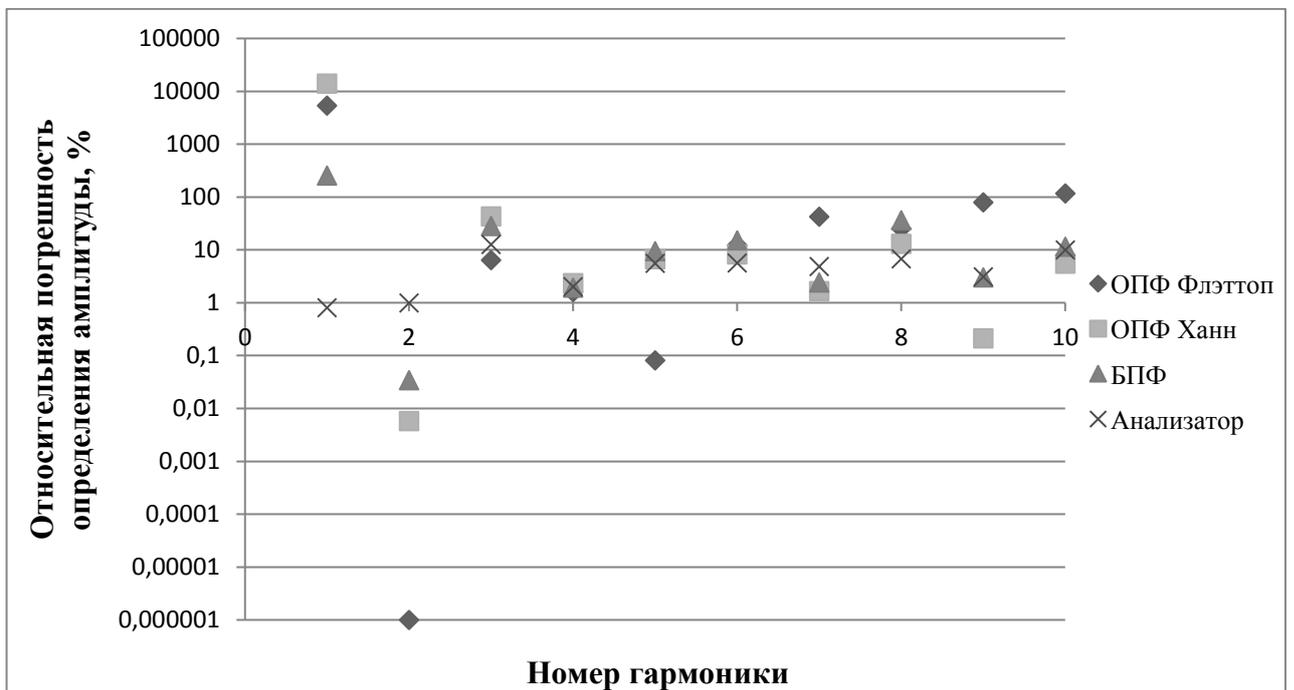


Рис. 3.14. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи 2 с (график в логарифмическом масштабе)

Таблица 3.4. Результаты анализа тест-сигнала при использовании БПФ

Номер гармоники	Амплитуда гармоники, мВ, при времени записи				
	30 сек	10 сек	5 сек	3 сек	2 сек
1	1,089	0,901	1,076	1,083	2,215
2	163,04	171,8	172,63	172,8	172,84
3	4,627	4,072	5,898	5,879	4,331
4	12,482	13,422	9,194	12,015	13,2
5	5,72	4,666	6,249	6,469	5,561
6	4,603	5,668	5,95	4,169	5,076
7	5,278	4,982	5,576	5,017	5,743
8	4,728	3,925	3,932	4,599	3,001
9	3,172	4,134	4,242	2,92	4,377
10	1,457	1,337	1,778	2,125	1,753

Таблица 3.5. Результаты анализа тест-сигнала при использовании ОПФ (окно Ханна)

Номер гармоники	Амплитуда гармоники, мВ, при времени записи				
	30 сек	10 сек	5 сек	3 сек	2 сек
1	0,62	0,577	0,606	0,531	88,08
2	169	172,47	172,79	172,86	172,89
3	5,477	5,254	5,769	5,816	8,654
4	13,075	13,419	11,69	12,798	13,143
5	5,968	5,523	5,797	6,132	5,731
6	5,434	5,831	5,95	5,212	5,493
7	5,476	5,347	5,54	5,323	5,512
8	4,737	4,399	4,41	4,61	4,121
9	3,808	4,197	3,761	3,701	4,239
10	1,771	1,712	1,911	1,973	1,87

Таблица 3.6. Результаты анализа тест-сигнала при использовании ОПФ (окно Флэттоп)

Номер гармоники	Амплитуда гармоники, мВ, при времени записи				
	30 сек	10 сек	5 сек	3 сек	2 сек
1	0,619	0,62	0,62	34,625	34,134
2	172,94	172,91	172,91	172,9	172,9
3	6,045	6,041	6,047	6,047	6,434
4	13,468	13,463	13,454	13,466	13,68
5	6,142	6,14	6,142	6,141	6,146
6	6	5,992	5,991	5,987	6,73
7	5,607	5,607	5,606	5,607	3,207
8	4,738	4,738	4,738	4,738	5,941
9	4,247	4,248	4,246	4,245	0,863
10	1,975	1,979	1,981	1,98	4,295

Таблица 3.7. Результаты анализа тест-сигнала при использовании разработанного анализатора

Номер гармоники	Амплитуда гармоники, мВ, при времени записи				
	30 сек	10 сек	5 сек	3 сек	2 сек
1	0,622	0,624	0,626	0,641	0,625
2	172,81	172,58	172,24	171,76	171,17
3	6,048	6,177	6,091	6,567	6,81
4	13,459	13,523	13,474	13,694	13,737
5	6,15	6,228	6,213	6,465	6,487
6	5,995	6,069	6,06	6,309	6,331
7	5,599	5,647	5,612	5,826	5,879
8	4,736	4,785	4,755	4,968	5,057
9	4,242	4,261	4,239	4,323	4,38
10	1,973	2,009	1,971	2,144	2,23

**Примечание:** в таблицах 3.4–3.7 серым цветом отмечены ячейки, где относительная погрешность измерения превысила 10%.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Как видно из рис. 3.11, 3.12 и табл.3.4–3.7, при использовании в чистом виде БПФ и ОПФ с окнами высокого разрешения (на примере окна Ханна) погрешности измерения даже при достаточно большом времени записи сигнала (5–30 сек) уже имеют неприемлемые значения, в то время как разработанный анализатор, а также ОПФ с окнами низкого разрешения (Флэттоп) определяют соответствующие гармоники с высокой точностью (погрешность не превышает нескольких процентов).

При малых значениях времени записи сигнала (2–3 сек.) даже с помощью окна Флэттоп становится невозможным точное определение амплитуд некоторых гармоник (рис. 4, 5). Одна из них – гармоника №1 (табл. 3.3), которая расположена близко к основной гармонике сети (гармоника №2 в табл.3.3), так как ширина главного лепестка в амплитудно-частотной характеристике окна Флэттоп имеет слишком большую величину (в 5 раз превышает ширину главного лепестка прямоугольного окна). Кроме того, анализатор на базе окна Флэттоп неверно определяет амплитуды гармоник ФОР высокого порядка (гармоники №№7–10 на рис. 3.14). Как будет показано далее – причина этому неверное определение скольжения, от которого зависят значения частот гармоник ФОР. При этом разработанный анализатор определяет все амплитуды гармоник ФОР с достаточно высокой точностью (погрешность не превышает 15 %).

Также для сравнения разработанного анализатора и окна Флэттоп дополнительно была произведена оценка значения скольжения при различном времени записи. Результаты расчёта, приведенные в табл. 3.8 и на рис. 3.15, показывают, что использование окна Флэттоп приводит к большим погрешностям определения скольжения даже при времени записи 5 сек, а при времени записи 1 и 2 сек значение скольжения получалось завышенным почти в 2 раза. При этом разработанный алгоритм определяет скольжение практически без погрешности вплоть до времени записи сигнала 1 сек.

Таблица 3.8. Результаты определения скольжения с помощью окна Флэттоп и разработанного анализатора спектра

Точное значение скольжения	Время записи сигнала	Значение скольжения, определённое с помощью:	
		Анализатора	ОПФ (Флэттоп)
0,02165	30	0,02165	0,022
	20	0,0217	0,022
	10	0,0216	0,022
	5	0,02165	0,02
	3	0,0216	0,02
	2	0,02155	0,03
	1	0,0216	0,04

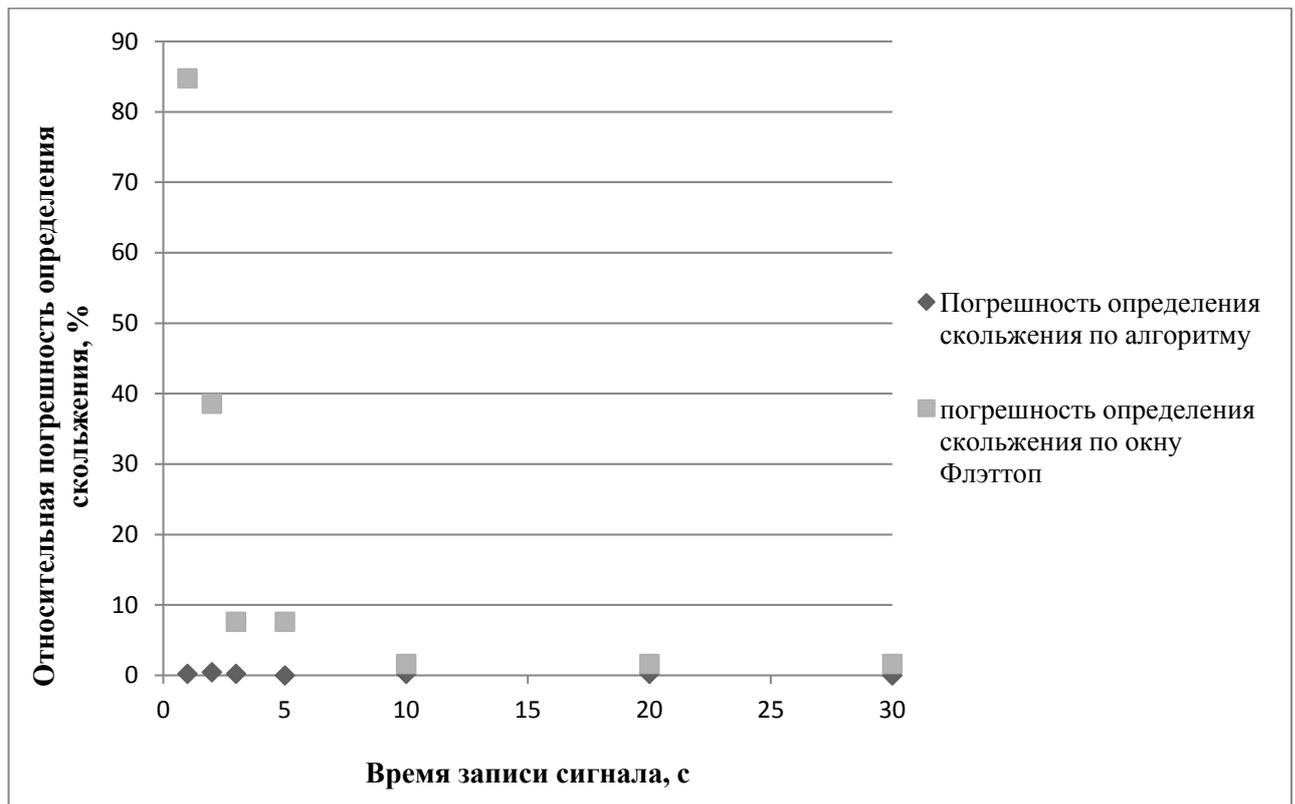


Рис. 3.15. Относительная погрешность определения скольжения

Проведенное сравнение подтвердило, что традиционные методы спектрального анализа, основанные на БПФ или ОПФ, плохо подходят для контроля состояния электродвигателей, так как не могут обеспечить нужную

точность и стабильность результатов, особенно при уменьшении времени регистрации сигналов. Разработанный анализатор спектра на базе АВЗС успешно решает эту задачу, обеспечивая более высокую точность определения амплитуд и частот гармонических составляющих спектра сигнала по сравнению с обычным БПФ и ОПФ. Еще одним преимуществом является высокая стабильность результатов, которая сохраняется даже при уменьшении времени регистрации сигнала.

Результаты исследований по спектральному анализу внешних магнитных полей асинхронных электродвигателей нашли отражение в трех патентах на изобретение [111 – 113]. Разработана компьютерная программа Slip Finder [114], которая позволяет определять величину скольжения АД.

Данные разработки позволяют создать новый класс измерительных приборов, позволяющих определять частоту вращения и скольжение асинхронного двигателя без доступа к вращающимся частям.

### **Выводы по главе 3**

1. ВМП АД содержит гармонические составляющие, частоты которых зависят от частоты сети, скольжения и числа пар полюсов. Зная эти параметры, в спектре ВМП можно гарантированно идентифицировать гармоники, генерируемые АД.

2. Для реализации метода диагностики ОР АД по ВМП необходим анализатор спектра, позволяющий с высокой точностью определять амплитуды и частоты любых гармонических составляющих сигнала, не требующий при этом большого времени записи сигнала, при этом традиционные методы спектрального анализа, основанные на БПФ или ОПФ не могут обеспечить высокую точность и стабильность результатов, особенно при уменьшении времени регистрации сигналов.

3. Для точного определения параметров гармоник спектра ВМП АД и минимизации времени записи сигнала разработан метод и алгоритм АВЗС, который позволяет минимизировать влияние растекания спектра сигнала на результаты спектрального анализа, что существенно повышает точность.

4. Определена методическая погрешность алгоритма АВЗС, величина которой может регулироваться не только с помощью изменения времени записи сигнала, но и за счет изменения частоты дискретизации АЦП.

5. Разработан способ определения скольжения по ГЭР первого порядка, присутствующим в ВМП АД.

6. Выведен критерий достоверности определения скольжения, который также может быть использован в качестве критерия определения качества регистрируемого сигнала.

7. Разработан скалярный анализатор спектра, который позволяет определять:

- частоту и амплитуду основной гармоники сети;
- скольжение АД;
- амплитуды и частоты гармоник ФОР.

Разработанный анализатор спектра обеспечивает более высокую точность определения амплитуд и частот гармонических составляющих спектра сигнала по сравнению с традиционными методами. Еще одним преимуществом является высокая стабильность результатов, которая сохраняется даже при уменьшении времени регистрации сигнала.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

### 4.1. Постановка задачи

Компьютерное моделирование, проведенное в главе 2 показало, что во ВМП АД присутствуют гармонические составляющие, частоты которых зависят от величины скольжения, и которые могут быть использованы для определения состояния узлов АД, в частности короткозамкнутой ОР.

На основе анализов результатов математического моделирования был сделан вывод, что для выявления обрывов стержней ОР целесообразно использовать гармоники ФОР, которые присутствуют в ВМП и значительно увеличивают свои амплитуды в случае обрыва стержня. На основании исследования влияния эксплуатационных факторов на амплитуды гармоник ФОР, было показано, что с точки зрения обеспечения достоверности результатов контроля, целесообразно использовать гармоники ФОР на нижних боковых частотах ( $\Phi OP\nu$ -). В качестве диагностического параметра обрыва стержней был предложен интегральный показатель – средняя мощность сигнала, состоящего из гармоник  $\Phi OP\nu$ - (2.6)

$$P_{\Phi OP-} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^5 B_{\nu-}^2.$$

Исходя из вышесказанного, можно сформулировать следующие задачи, решение которых требуется в данной главе:

1. Экспериментальное доказательство существования во ВМП АД гармонических составляющих (ФОР, ГЭР), частоты которых зависят от величины скольжения.
2. Проверка корректной работы, разработанного описанного в главе 3, анализатора спектра.

3. Экспериментальная проверка корректности результатов моделирования ВМП АД на конечноэлементных моделях. Оценка целесообразности учета эксплуатационных факторов при моделировании ВМП АД.
4. Разработка методики диагностирования ОР АД по ВМП.
5. Оценка помехозащищенности ВМП АД как источника диагностического сигнала.

#### **4.2. Методика проведения экспериментальных исследований**

В целях экспериментального исследования ВМП АД были разработаны два экспериментальных стенда, внешний вид которых представлен на рис. 4.1, 4.2. Стенд №1, изображенный на рис. 4.1 построен на базе АД №1 (ЗВР71-2), а стенд №2, представленный на рис. 4.2 – на основе АД №2 (АИР 71А6). Параметры АД представлены в табл. 2.1. Принцип работы обоих стендов одинаков. Объектом исследования является трехфазный АД (1), нагрузка на валу которого создается с помощью генератора переменного тока (2), к которому подключены лампы накаливания (6). Для регистрации магнитного поля в воздушном зазоре АД используется датчик ВИД, который представляет собой два витка провода, намотанных на зубец статора. В АД №1 установлен один датчик ВИД, а в АД №2 – три, под углом  $120^{\circ}$  по отношению друг к другу. Для регистрации ВМП используется датчик Холла (ДХ) ((8) на рис. 4.2), типа SS496A, производства компании Honeywell, который запитан от блока питания ((9) на рис. 4.2). Более подробно эти элементы показаны на рис. 4.3, 4.4. В качестве АЦП применяются M-Audio Fast Track Pro (3) на стенде №1 (рис. 4.1) и Focusrite Scarlett 2i2 на стенде №2 (рис. 4.2, 4.3). Запись оцифрованного сигнала осуществляется на компьютер типа ноутбук (5). Для обработки и анализа полученных сигналов применяется программный комплекс Matlab. Для контроля электрических параметров используется измерительный комплект К-505 (4), а на стенде №2 в дополнение к

нему используется также многофункциональный измерительный прибор ЩМ120 ((10) на рис. 4.2). Для измерения частоты вращения ротора АД применяется цифровой оптический тахометр СЕМ АТ-8 (7).

Результаты измерения рабочих параметров АД №1 и АД №2 представлены в Прил. 2.

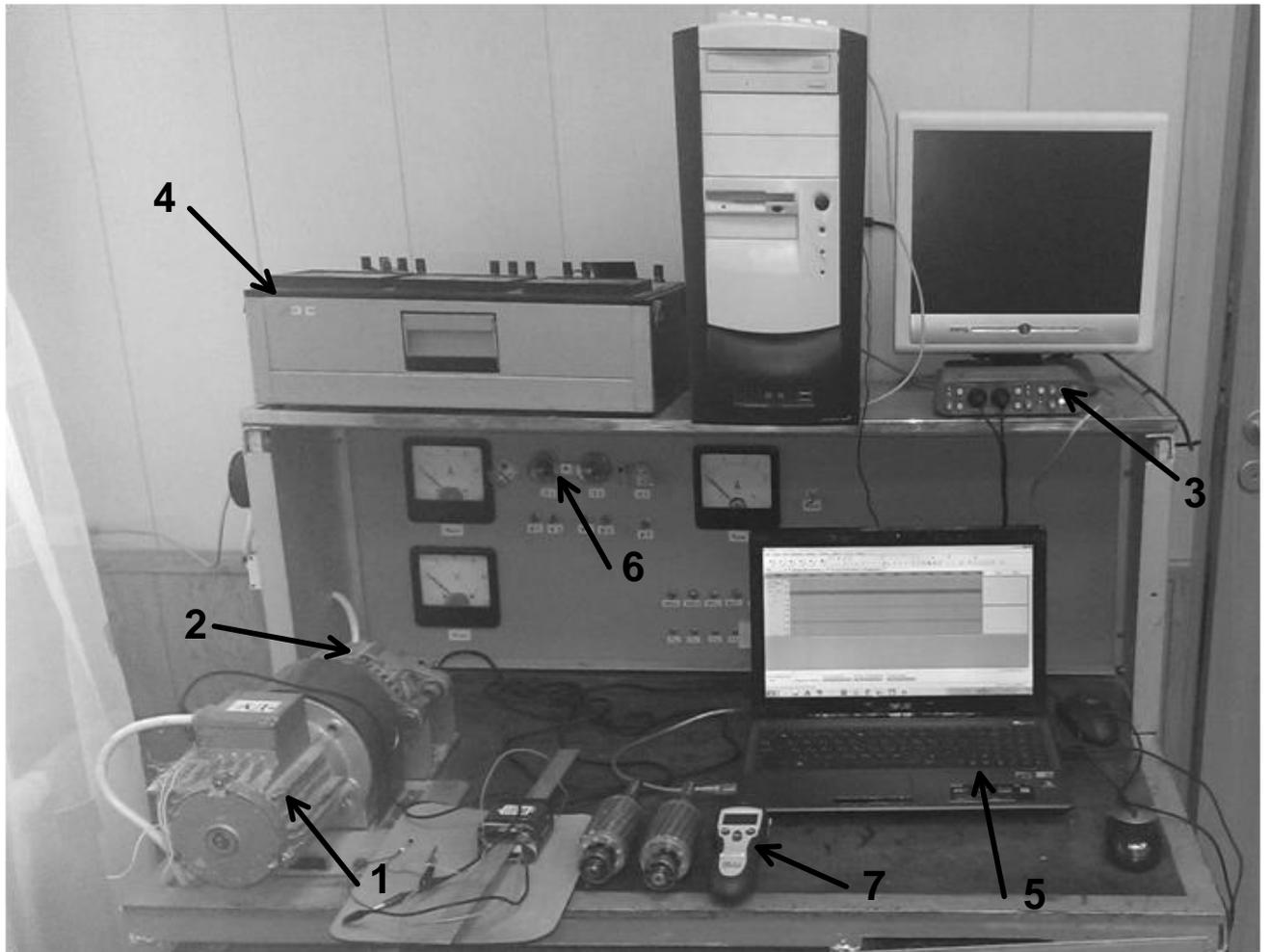


Рис. 4.1. Экспериментальный стенд №1 на базе АД №1

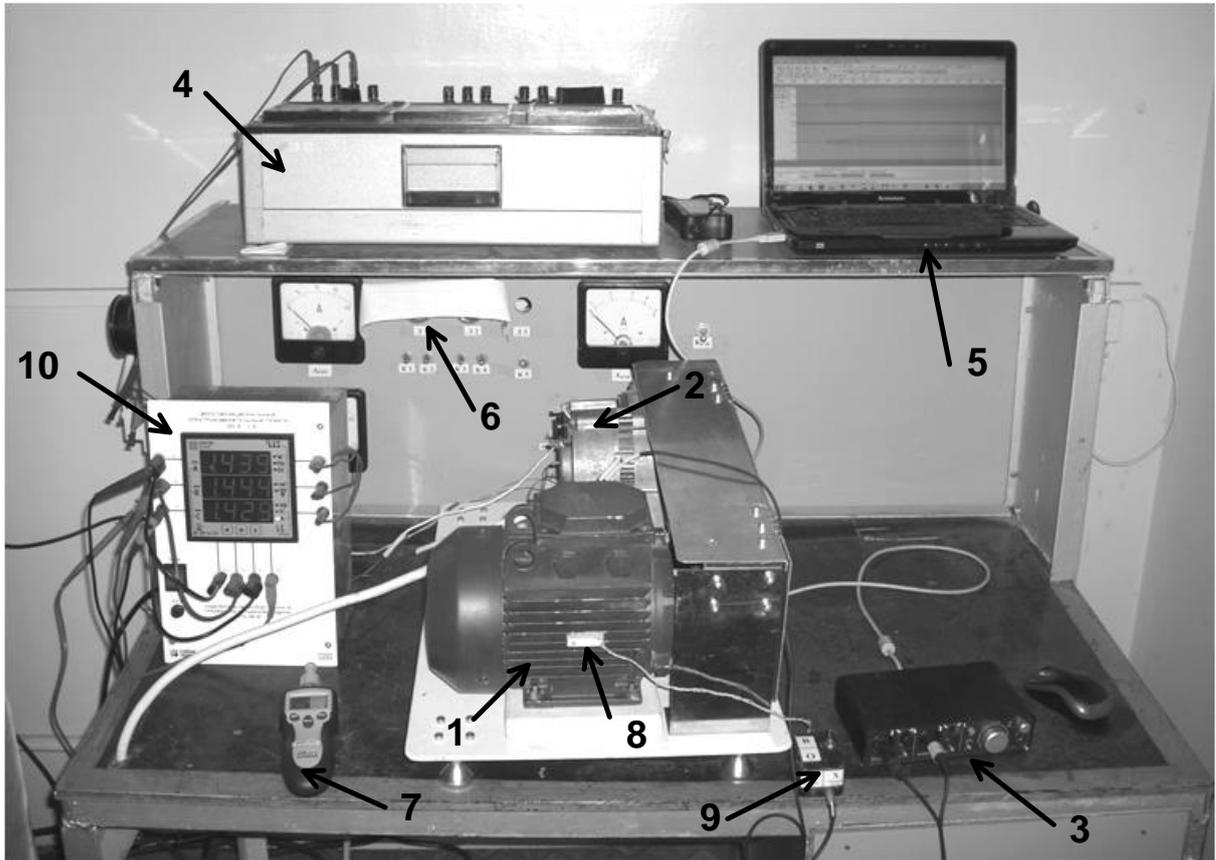


Рис. 4.2. Экспериментальный стенд №2 на базе АД №2

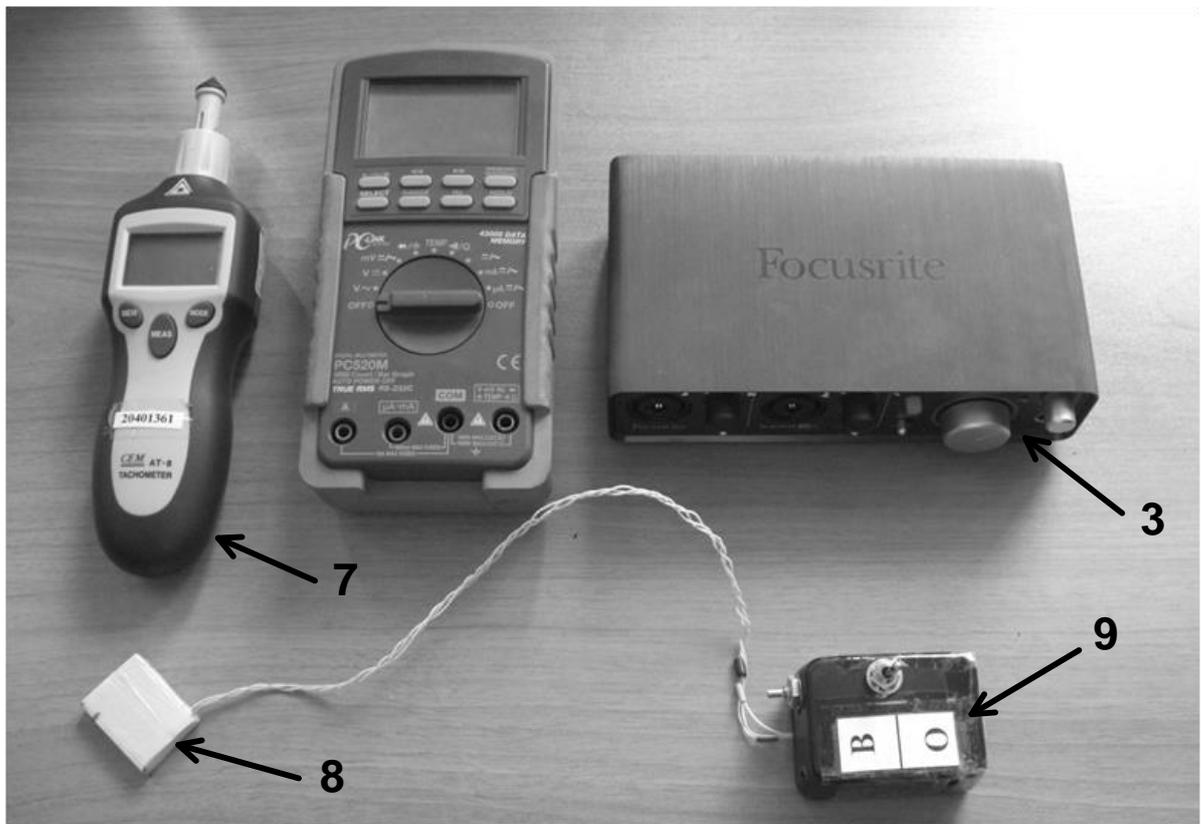


Рис. 4.3. Устройства измерения

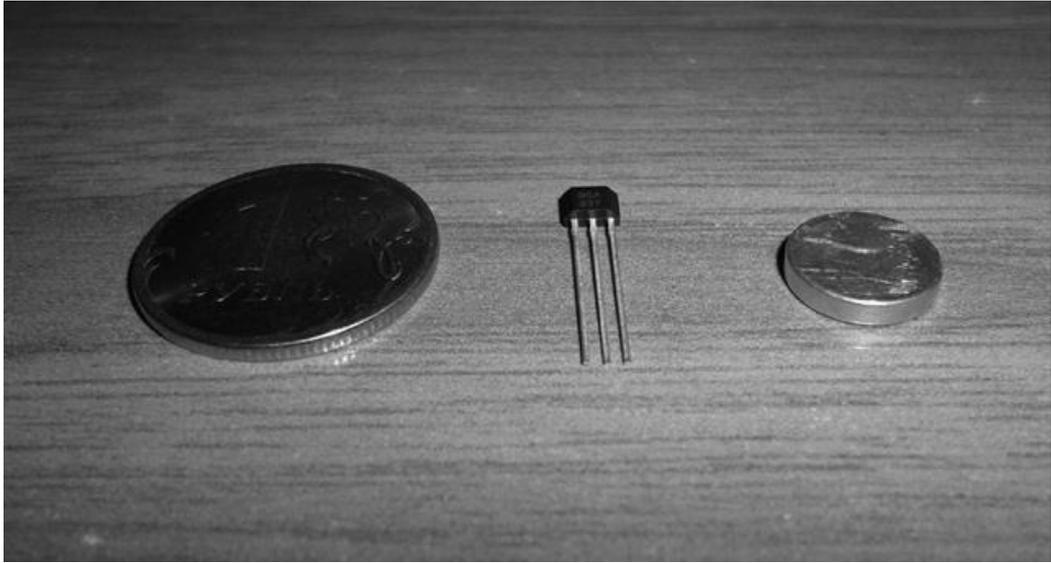


Рис. 4.4. Датчик Холла

Для изучения влияния повреждений ОР на магнитное поле сначала производились измерения на АД с исправной обмоткой ротора, затем высверливался один стержень (рис. 4.5) и проводилась еще серия измерений.

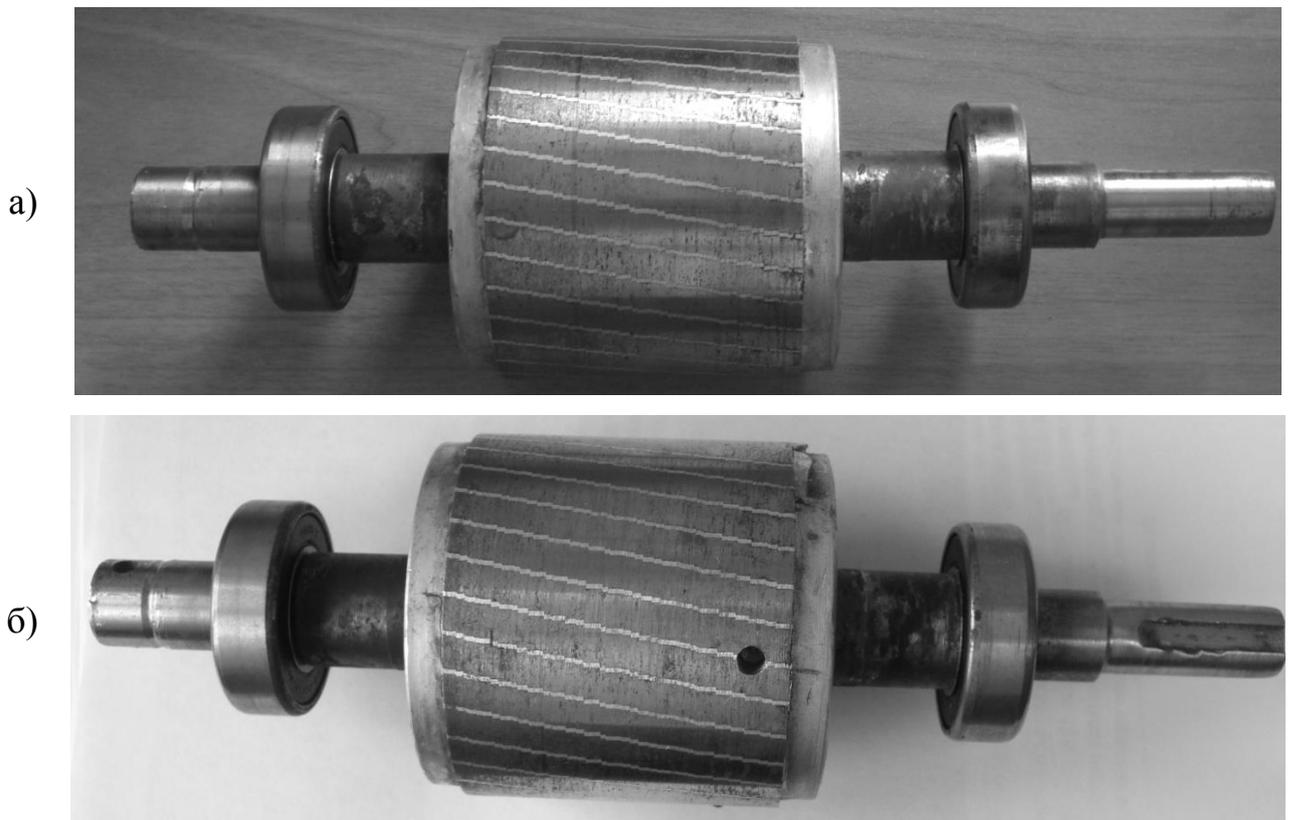


Рис. 4.5. Роторы АД №2:

а – исправный ротор; б – ротор с одним оборванным стержнем

Помимо экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, также были выполнены измерения в условиях реальной эксплуатации на АД 0,4 кВ котельной ИГЭУ и АД 0,4 и 6 кВ ИвТЭЦ-2. На рис. 4.6 показан процесс регистрации ВМП на корпусе двигателя 5А160S6У3 дымососа котельной ИГЭУ, а на рис. 4.7 – на корпусе двигателя ДАМСО-15-12-8 дымососа ИвТЭЦ-2.

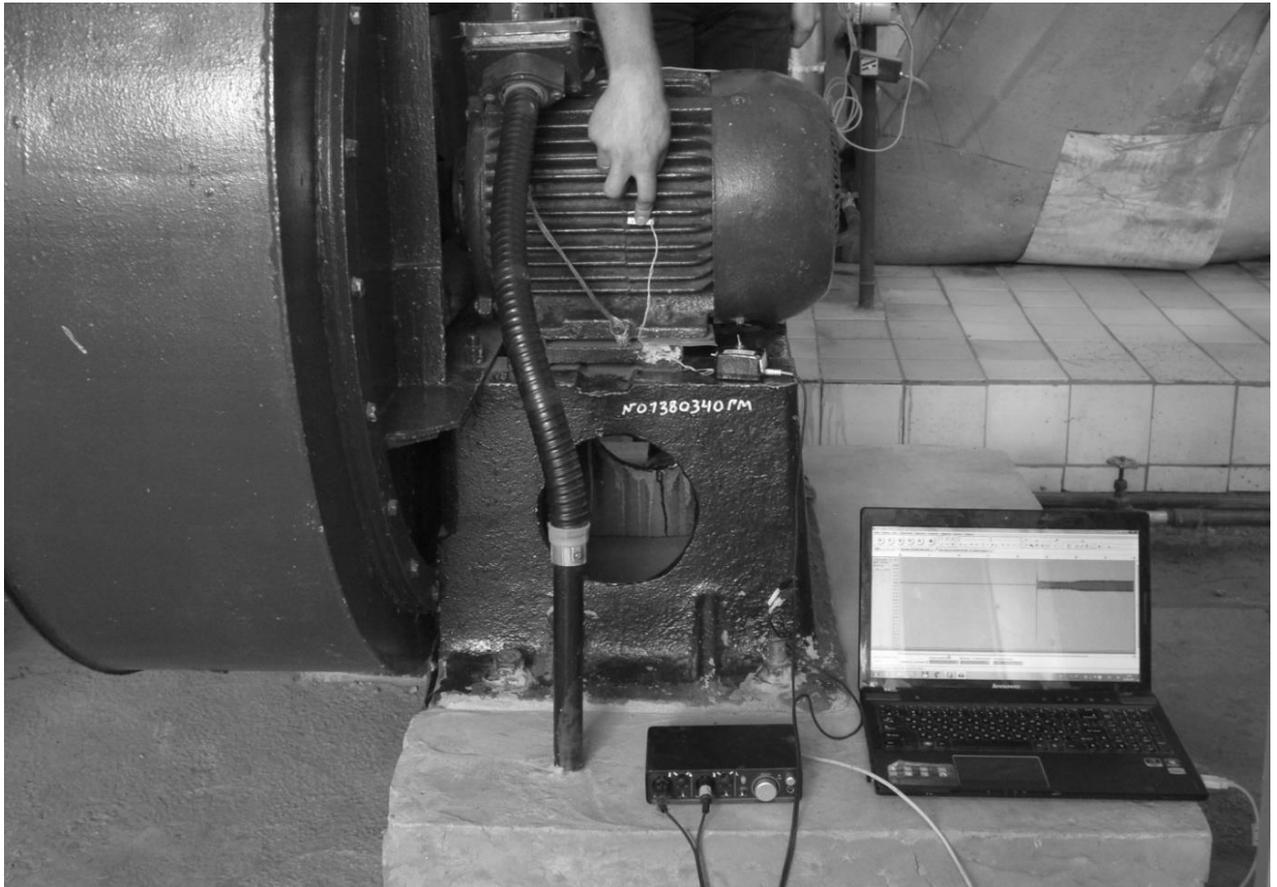


Рис. 4.6. Регистрация ВМП на корпусе двигателя 5А160S6У3 дымососа котельной ИГЭУ



Рис. 4.7. Регистрация ВМП на корпусе двигателя ДАМСО-15-12-8 дымососа ИвТЭЦ-2

### **4.3. Исследование внешнего магнитного поля при пуске электродвигателя**

Для оценки проявления ВМП на фоне шума была произведена регистрация сигналов при пуске и выбеге АД. Под шумом в данном случае понимается сигнал, обусловленный магнитными полями от внешних источников, а также собственным

шумом измерительной системы. При этом оценивались амплитуды сигналов до запуска двигателя, в пусковом режиме, после окончания переходного процесса (в установившемся режиме) и после отключения АД (выбег). На рис. 4.8 показана форма сигнала с ДХ, полученная при пуске АД экспериментального стенда, а на рис. 4.9 – при пуске электродвигателя дымососа 1Б ИвТЭЦ-2. На рис. 4.10 показана форма сигнала с ДХ, полученная при выбеге АД дымососа №2 котельной ИГЭУ.

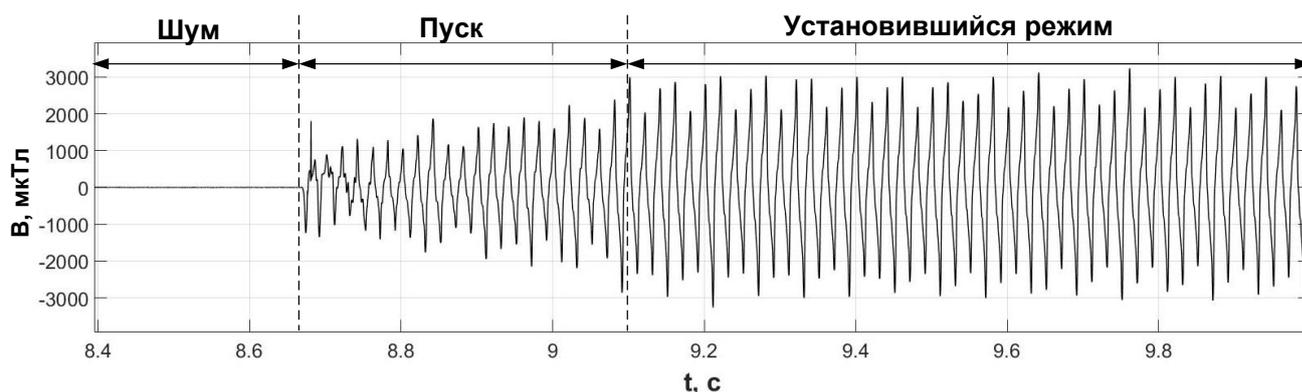


Рис. 4.8. Форма сигнала с ДХ при пуске АД №2

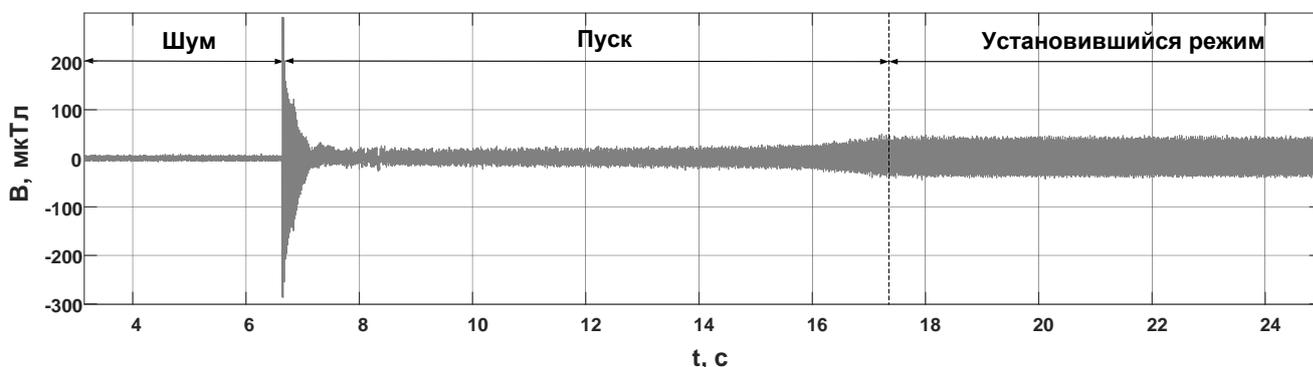


Рис. 4.9. Форма сигнала с ДХ при пуске двигателя ДАМСО-15-12-8 дымососа 1Б ИвТЭЦ-2

Результаты анализа полученных сигналов показывают, что при пуске АД ВМП отчетливо проявляется на фоне шума. Уровень сигнала, зафиксированный после пуска АД многократно превышает величину сигнала при отключенном двигателе. Из рис. 4.8, 4.9 видно, что на АД №2 величина индукции ВМП в установившемся режиме составляет приблизительно 2200 мкТл, в то время как при отключенном АД она не превышает 5 мкТл, для двигателя дымососа 1Б это соотношение составляет 50 и 5 мкТл.

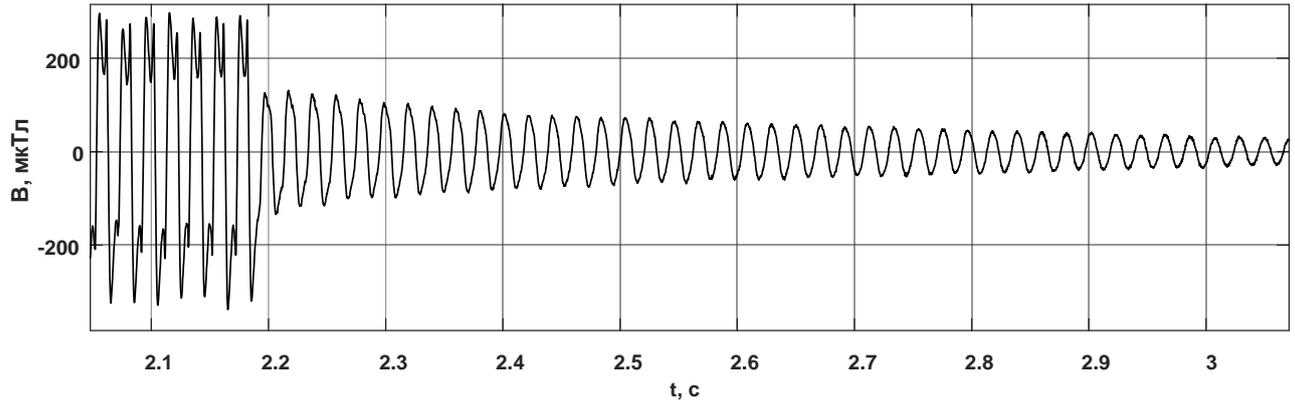


Рис. 4.10. Форма сигнала с ДХ при выбеге АД 5АИ160S6У3 дымососа №2 котельной ИГЭУ

Из рис. 4.10 видно, что после отключения АД его ВМП не исчезает, а медленно идет на убыль. Очевидно ВМП в этом случае обусловлено остаточной намагниченностью ротора. Теоретически, это можно использовать для разработки новых методов контроля состояния ОР, так как в режиме выбега будет регистрироваться ВМП только от ротора АД.

#### **4.4. Доказательство существования гармоник эксцентриситета ротора во внешнем магнитном поле асинхронного электродвигателя**

На основе исследования виртуальных сигналов, полученных в ходе математического моделирования, в главе 3 был разработан анализатор спектра, позволяющий определять амплитуды и частоты информативных составляющих спектра ВМП АД. Для нахождения нужных гармонических составляющих необходимо знать величину скольжения, которую было предложено определять по ГЭР первого порядка, которые могут быть определены по выражению (2.4):

$$f_{ГЭР}^{(\pm)} = f_c \cdot \left( 1 \pm \frac{(1-s)}{p} \right).$$

Для подтверждения возможности практической реализации данного способа необходимо доказательство присутствия ГЭР в ВМП АД. Для этого были проведены следующие эксперименты.

На АД №1 и №2 экспериментальных стендов при различных нагрузках на валу ротора выполнена регистрация ВМП. При этом на каждой ступени нагрузки с помощью тахометра производилось измерение частоты вращения ротора, а с помощью частотомера измерялась частота сети.

По измеренным значениям частоты вращения и частоты сети определено скольжения АД, после чего по выражению (2.4) произведен расчет частот ГЭР первого порядка, результаты представлены в табл. 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1. Расчетные значения частот ГЭР АД №1

Нагрузка, %	10	50	100	150
Частота вращения, об/мин	2984	2938	2897	2848
Скольжение, о.е.	0,0057	0,021	0,034	0,051
Частота ГЭР 1+, Гц	99,7	98,9	98,2	97,4

Таблица 4.2. Расчетные значения частот ГЭР АД №2

Нагрузка, %	15	30	50	80	120
Частота вращения, об/мин	990	981	970	955	935
Скольжение, о.е.	0,01	0,019	0,029	0,044	0,064
Частота ГЭР 1-, Гц	33,5	33,6	33,8	34,1	34,4
Частота ГЭР 1+, Гц	66,5	66,3	66,1	65,9	65,6

Далее были сформированы амплитудные спектры зарегистрированных сигналов. На рис 4.11 показаны амплитудные спектры ВМП АД №1, а на рис. 4.12 – АД №2.

Анализ экспериментальных данных показал, что в спектрах ВМП АД №1 и №2 имеются четко выраженные гармонические составляющие, частоты которых совпадают с расчетными значениями частот ГЭР, представленными в табл. 4.1 и

4.4. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что обнаруженными гармониками являются ГЭР, которые действительно присутствуют в спектре ВМП.

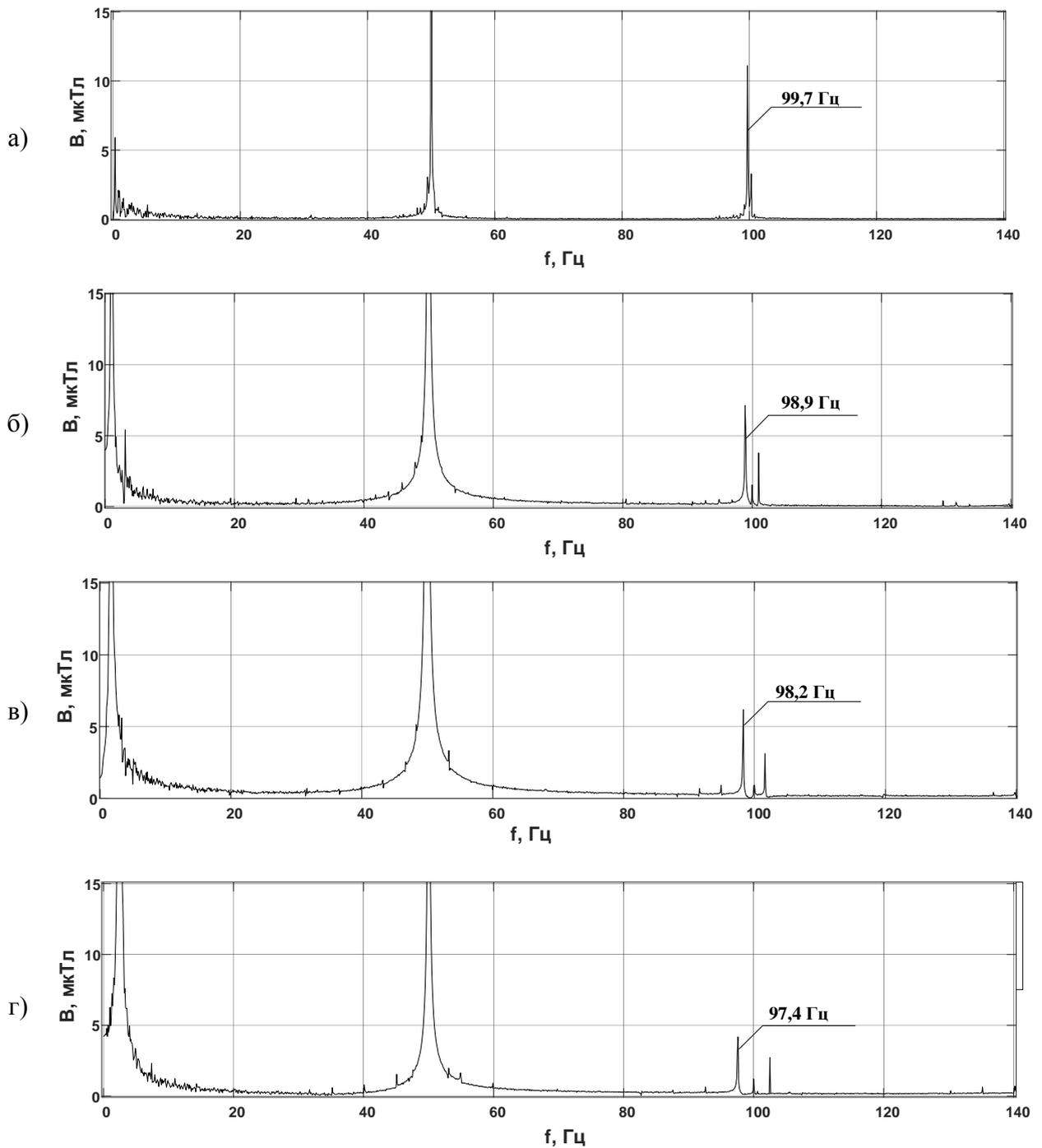


Рис. 4.11. Амплитудные спектры ВМП АД №1:

а – нагрузка на валу 10%; б – нагрузка на валу 50%; в – нагрузка на валу 100%;  
г – нагрузка на валу 150%

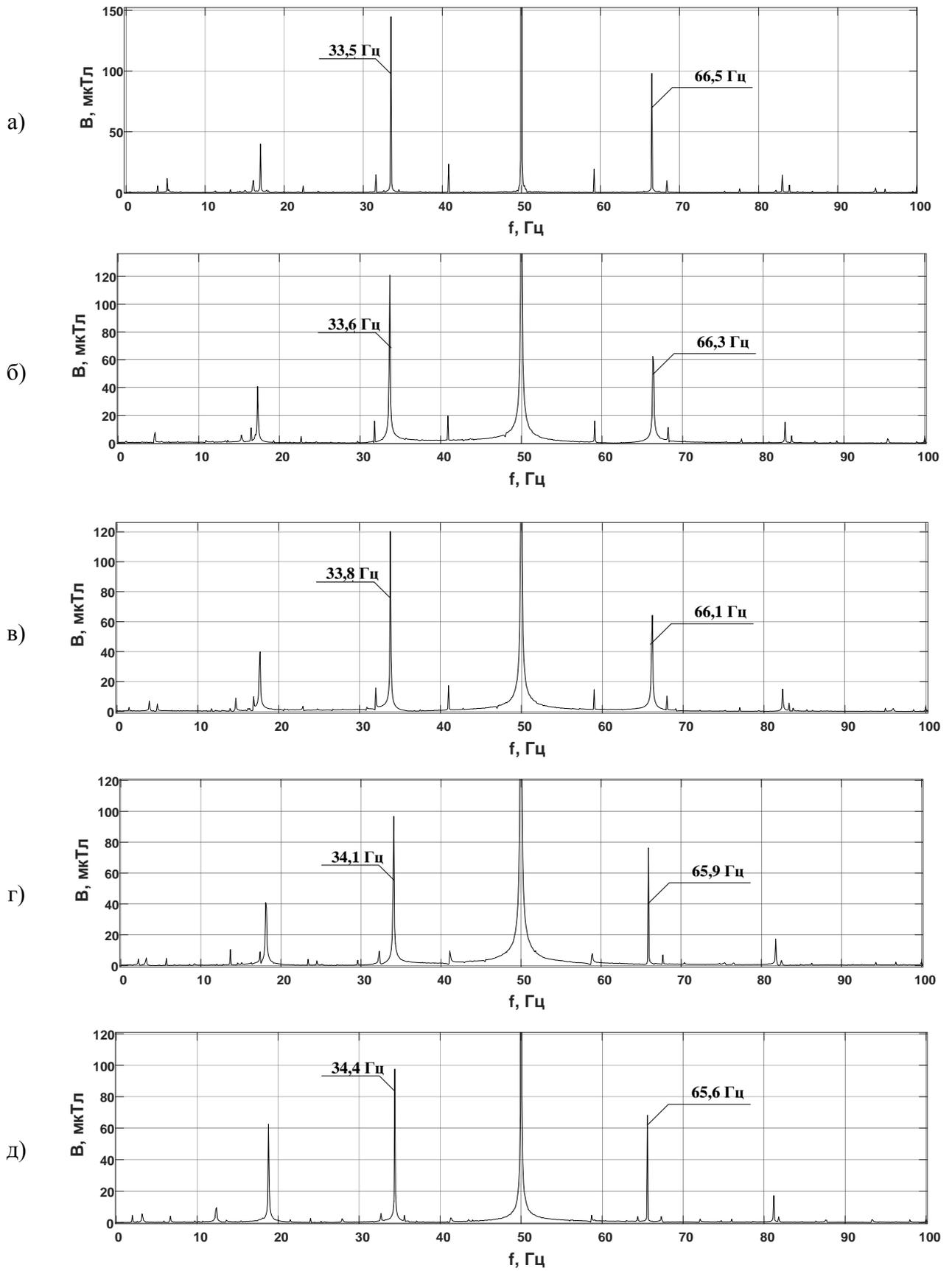


Рис. 4.12. Амплитудные спектры ВМП АД №2:

а – нагрузка на валу 10%; б – нагрузка на валу 30%; в – нагрузка на валу 50%; г – нагрузка на валу 80%; д – нагрузка на валу 120%

Так же было произведено исследование спектров ВМП АД, находящихся в эксплуатации. Параметры исследуемых двигателей представлены в табл. 4.3, полученные спектры ВМП показаны на рис. 4.13–4.20

Таблица 4.3. Параметры исследуемых АД

№	Тип механизма	Тип двигателя	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, кВт	Напряжение, кВ
1	Дымосос №1	5A160S6Y3	3	970	11	0,4
2	Дутьевой вентилятор №1	AIP160S6Y3	3	970	11	0,4
3	Сетевой насос № 4	AIP160M2Y3	1	2900	18,5	0,4
4	Дымосос 3А	ДАМСО-15-12-8	4	740	570	6
5	Дымосос 2Б	ДАМСО-15-12-8	4	740	570	6
6	Дымосос 8А	A3-13-42-8	4	740	400	6
7	Дутьевой вентилятор 7А	ДАЗО-12-55-6\8	3/4	742/990	105/250	0,4
6	Фосфатный насос №5	4AM100S4CY1	2	1410	3	0,4

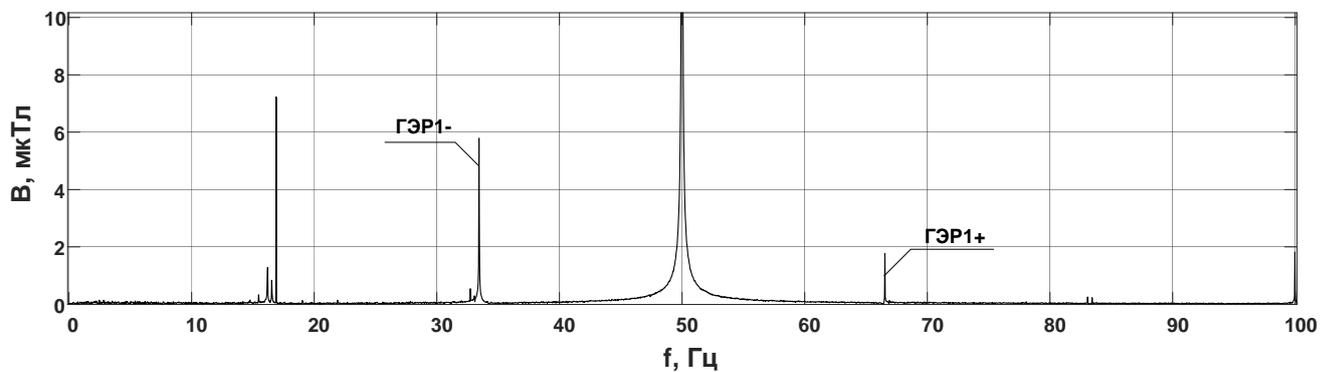


Рис. 4.13. Амплитудный спектр ВМП АД дымососа №1 котельной ИГЭУ

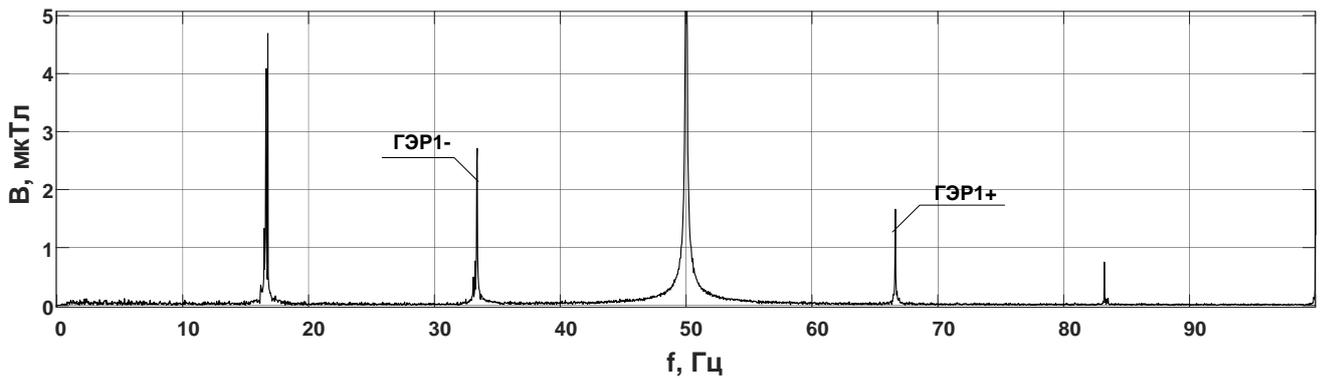


Рис. 4.14. Амплитудный спектр ВМП АД дутьевого вентилятора №1 котельной ИГЭУ

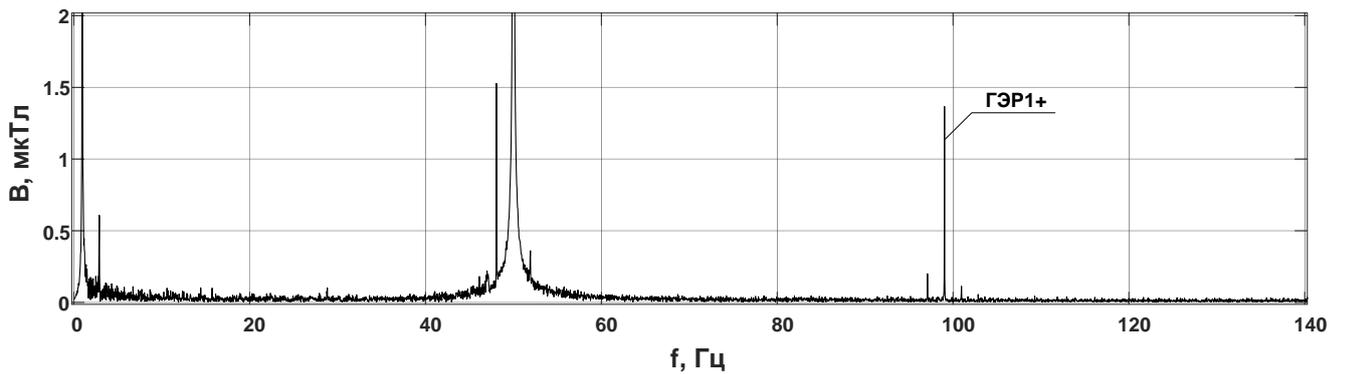


Рис. 4.15. Амплитудный спектр ВМП АД сетевого насоса № 4 котельной ИГЭУ

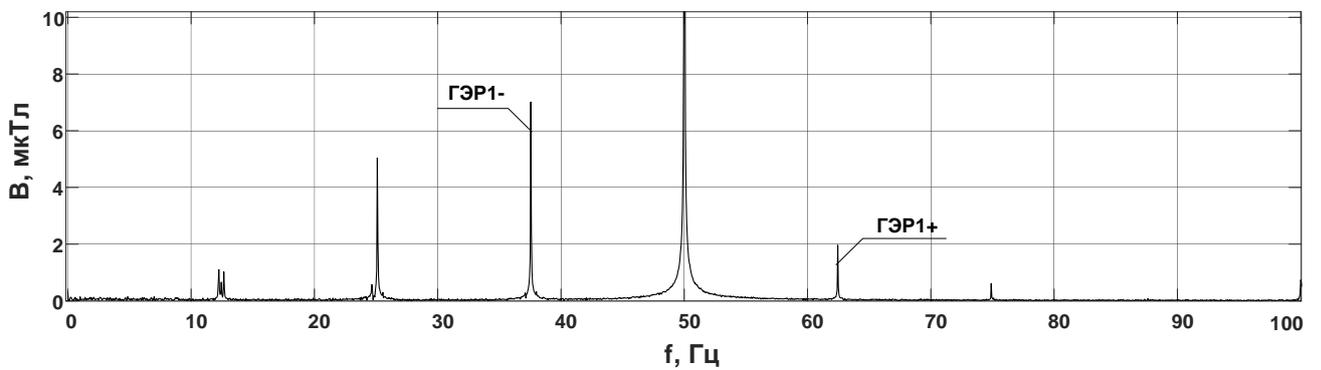


Рис. 4.16. Амплитудный спектр ВМП АД дымососа 3А ТЭЦ (6 кВ)

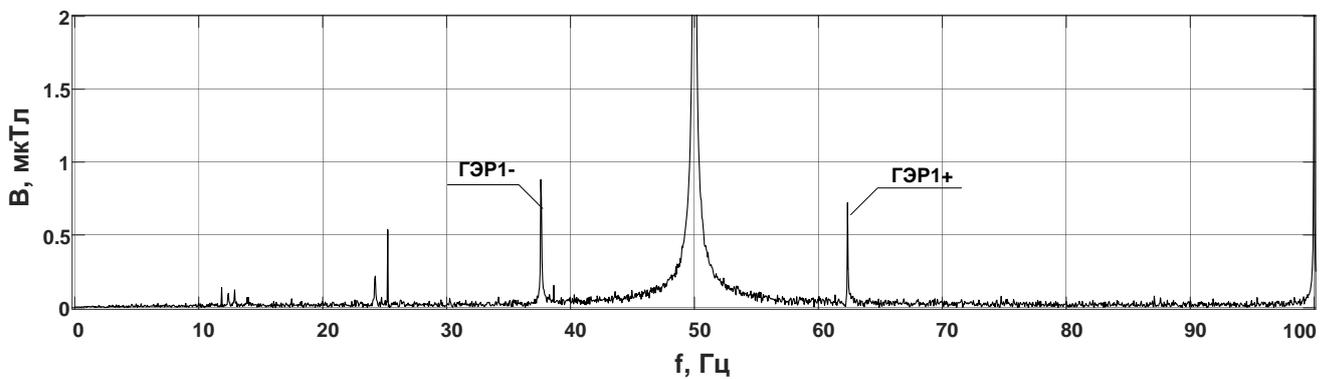


Рис. 4.17. Амплитудный спектр ВМП АД дымососа 2Б ИвТЭЦ-2 (6 кВ)

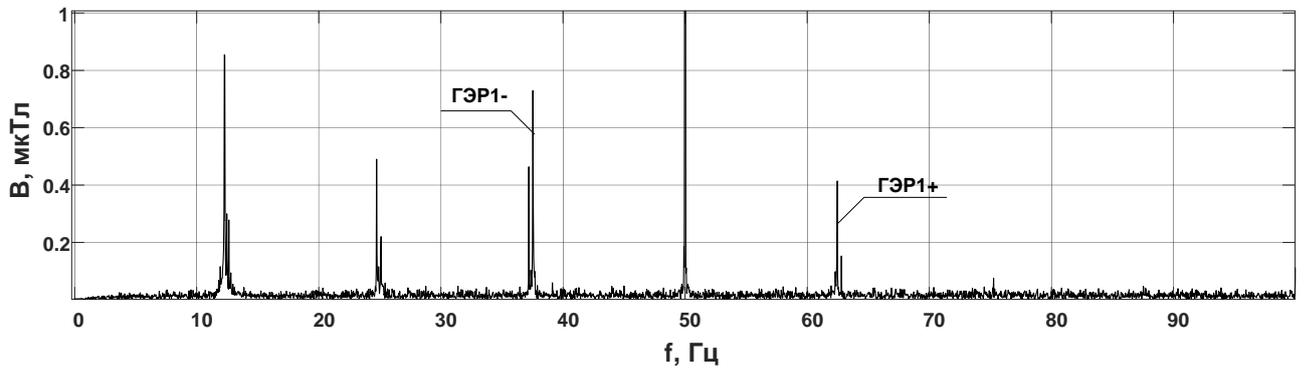


Рис. 4.18. Амплитудный спектр ВМП АД дымососа 8А ИвТЭЦ-2 (6 кВ)

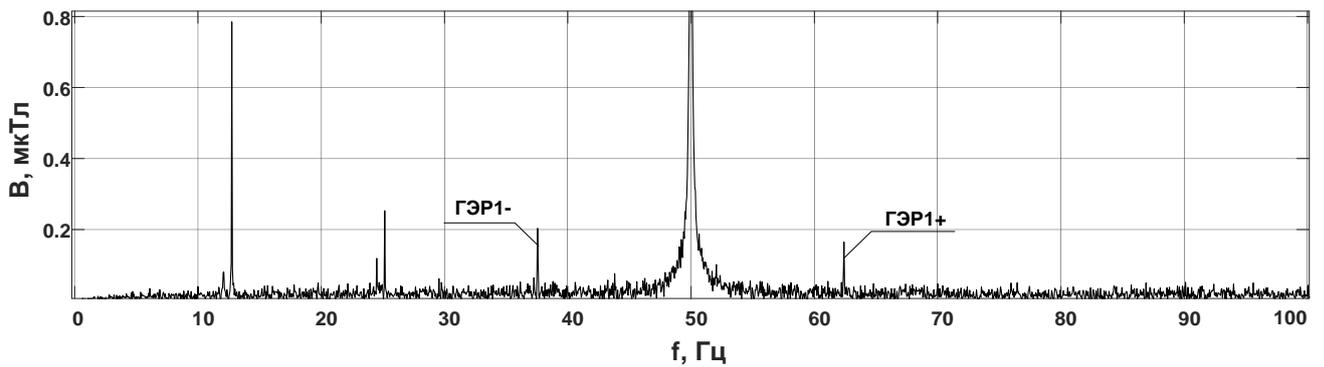


Рис. 4.19. Амплитудный спектр ВМП АД дутьевого вентилятора 7А ИвТЭЦ-2

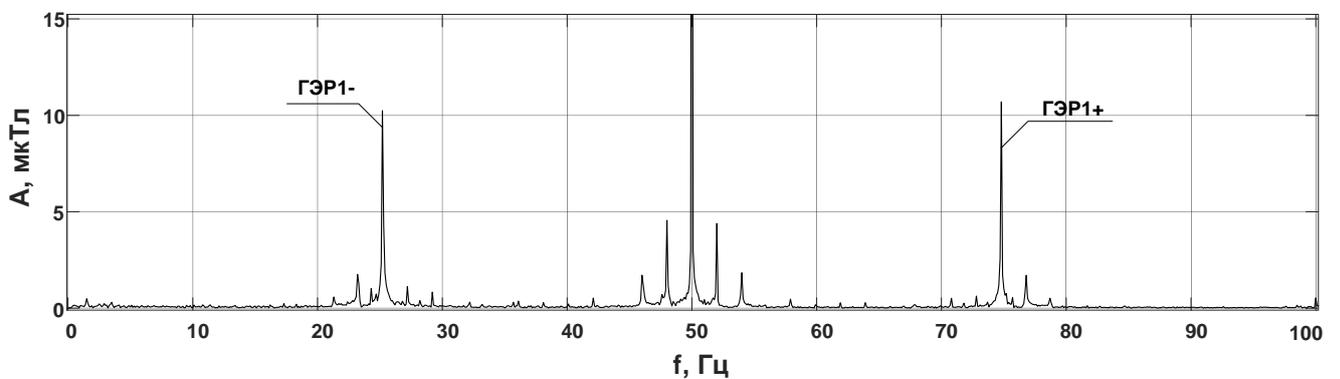


Рис. 4.20. Амплитудный спектр ВМП АД 4АМ100S4СУ1 фосфатного насоса №5 ИвТЭЦ-2

Проведенный спектральный анализ сигналов (см. рис. 4.13–4.20) показал, что ГЭР первого порядка действительно присутствуют в ВМП АД. Данные гармоники выделяются на фоне других гармонических составляющих сигнала, причем ГЭР удалось обнаружить даже в спектрах ВМП АД закрытого исполнения (см. рис. 4.18–4.19).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ГЭР действительно присутствуют в спектре ВМП и могут использоваться для определения величины скольжения АД напряжением как 0,4 кВ, так и 6 кВ.

#### **4.5. Анализ практической эффективности применения алгоритма автоматической коррекции времени записи сигнала**

В результате теоретической оценки эффективности алгоритма АВЗС, проведенной в главе 3, было установлено, что для определения скольжения по ГЭР достаточно времени записи сигнала, не превышающего 10 с. Таким образом, наблюдается многократное уменьшение времени записи сигнала по сравнению с «простым» определением скольжения по ГЭР, приведенным в [5]. Рассмотрим, какой эффект дает применение алгоритма АВЗС при определении скольжения на реальном двигателе. Для этого на АД №1 экспериментального стенда произведены измерения скольжения и частоты вращения ротора следующими способами:

1. С помощью оптического тахометра определялось эталонное значение частоты вращения. При определении скольжения использовалось значение частоты питающей сети, полученное с помощью частотомера. Инструментальная погрешность данного способа составляет примерно 4% при номинальной нагрузке двигателя (100%) и 8% при нагрузке 50% от номинальной;

2. по ЗГР и ГЭР, используя методы, описанные в [5];

3. по ГЭР с применением алгоритма АВЗС.

Измерения проводились при различных нагрузках на валу ротора с временем записи сигнала от 0.5 до 20 с и частотой дискретизации АЦП равной 10 кГц. Результаты измерений приведены в табл. 4.4, 4.5 и на рис. 4.21, 4.22.

Таблица 4.4. Значения скольжения и частоты вращения АД №1 при нагрузке 50%

Время записи сигнала, с		20	10	7	5	3	1	0.5
ЗГР	Частота вращения ротора, об/мин	2936,2	2936,1	2959,9	2952,8	2961,1	2955,9	—
	Скольжение, о.е	0,0213	0,0213	0,0134	0,016	0,0129	0,0147	—
ГЭР	Частота вращения ротора, об/мин	2940,1	2940,1	2949,5	2962,1	2960,8	2960,3	—
	Скольжение, о.е	0,02	0,02	0,0171	0,0126	0,0133	0,0132	—
ГЭР с АВЗС	Частота вращения ротора, об/мин	2935,9	2935,9	2935,9	2936	2936	2935,3	2953,1
	Скольжение, о.е	0,0213	0,0213	0,0214	0,0214	0,0214	0,0216	0,0158
Оптический тахометр	Частота вращения ротора, об/мин	2936±1,5						
	Скольжение, о.е	0,0213						

Таблица 4.5. Значения скольжения и частоты вращения АД №1 при нагрузке 100%

Время записи сигнала, с		20	10	7	5	3	1	0.5
ЗГР	Частота вращения ротора, об/мин	2890,8	2890,7	2890,9	2924,8	2910,6	2959,2	—
	Скольжение, о.е	0,0365	0,0364	0,0364	0,0250	0,0298	0,0136	—
ГЭР	Частота вращения ротора, об/мин	2889,9	2891,5	2897,1	2903,9	2900	2940,5	—
	Скольжение, о.е	0,0360	0,0355	0,0343	0,0320	0,0333	0,0198	—
ГЭР с АВЗС	Частота вращения ротора, об/мин	2890,6	2890,4	2890,5	2890,4	2890,4	2890,6	2890,1
	Скольжение, о.е	0,0358	0,0359	0,0358	0,0359	0,0359	0,0358	0,036
Оптический тахометр	Частота вращения ротора, об/мин	2891±1,45						
	Скольжение, о.е	0,0357						

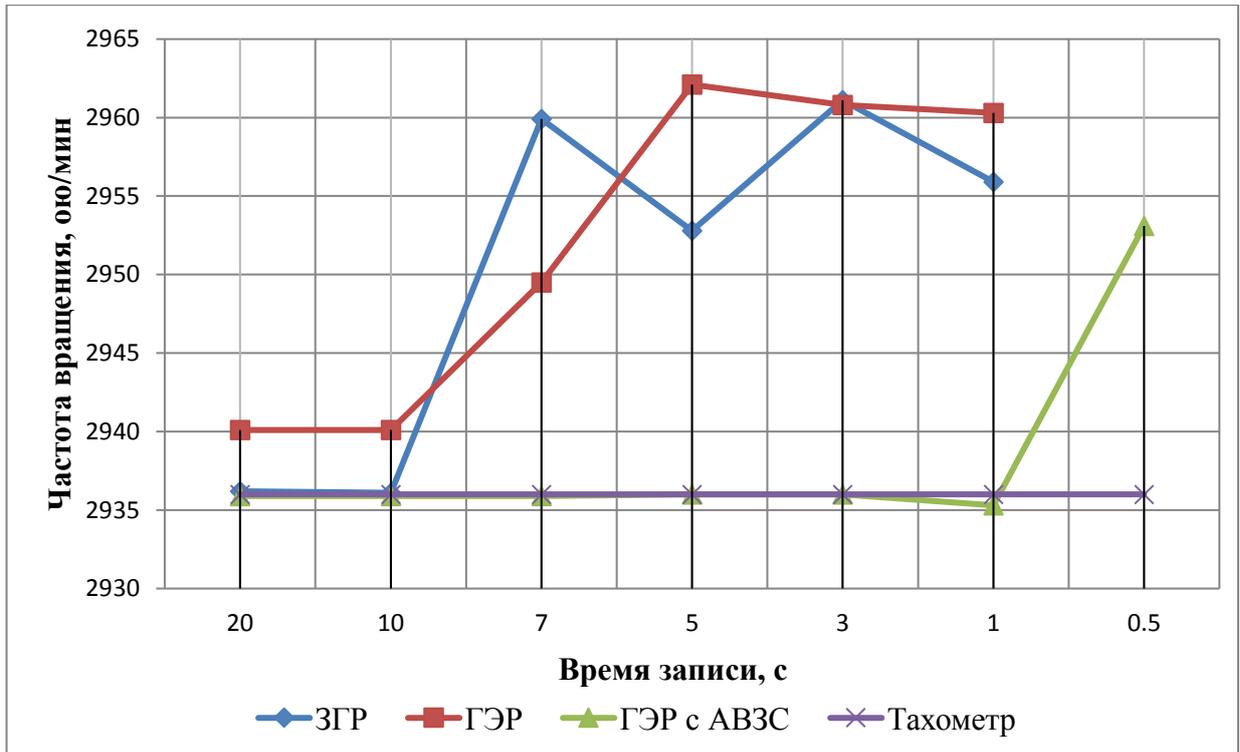


Рис. 4.21. Определение частоты вращения ротора при нагрузке 50%

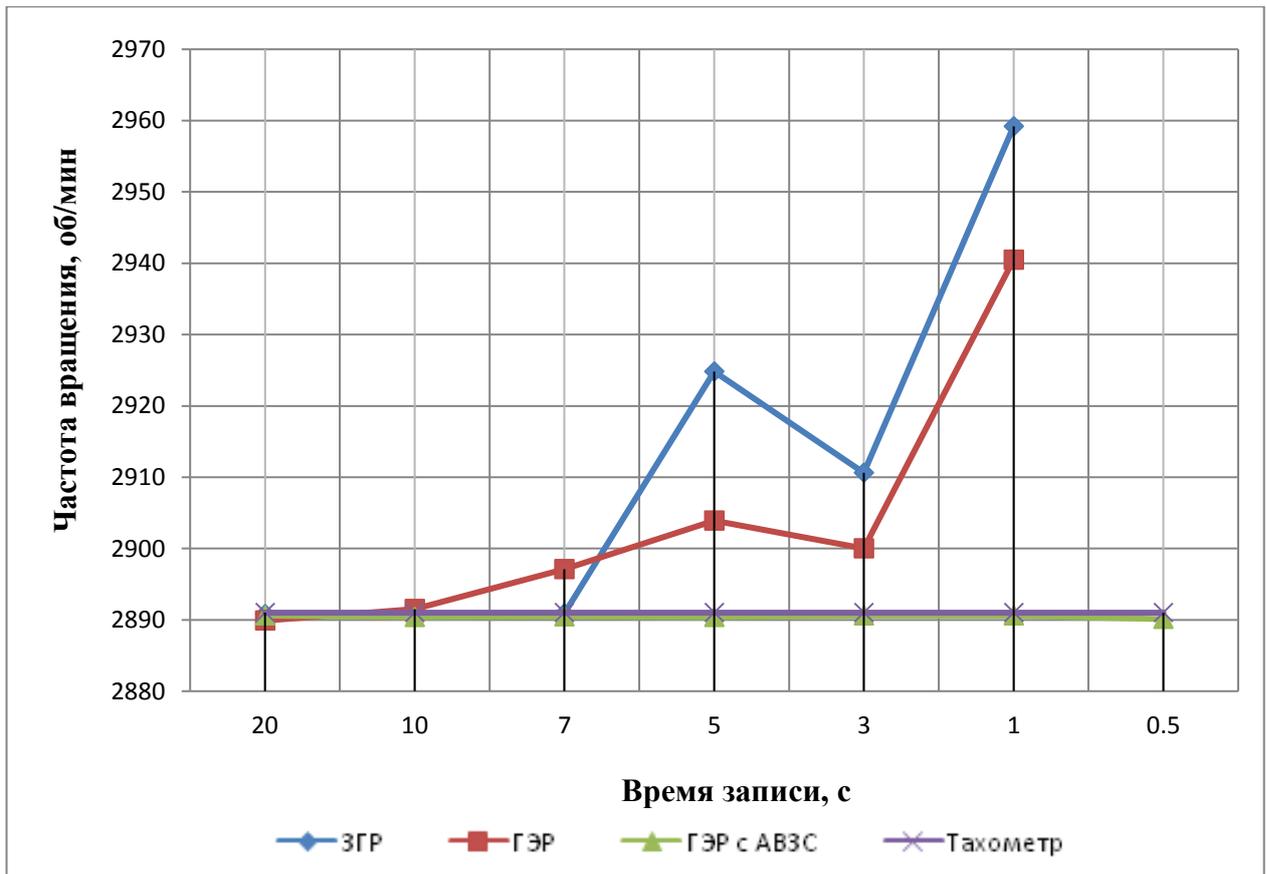


Рис. 4.22. Определение частоты вращения ротора при нагрузке при нагрузке 100%

Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Уменьшение времени записи приводит к заметному снижению точности определения скольжения и частоты вращения ротора по ЗГР и ГЭР без применения алгоритма АВЗС. Данный факт особенно заметен при длительностях времени записи сигнала, не превышающих 10 с. Значения погрешностей определения указанных выше параметров значительно превосходят значения инструментальных погрешностей, обусловленные погрешностями измерительных приборов.

2. Уменьшение времени записи вплоть до 1 с не оказало значительного влияния на результат измерения при определении скольжения и частоты вращения ротора по ГЭР с применением алгоритма АВЗС. Значения погрешностей определения указанных выше параметров не превышают значения инструментальных погрешностей.

В табл. 4.6, 4.7 представлены результаты измерений скольжения и частоты вращения двигателей фосфатных насосов (ФН) типа 4АМ100S4СУ1. Измерения проведены в рамках полевых исследований на ИвТЭЦ-2. Параметры двигателей представлены в табл. 4.3. Данные двигатели работают в режиме близком к холостому ходу, что добавляет дополнительную сложность в процесс измерений.

Таблица 4.6. Значения скольжения и частоты двигателя ФН-4

Время записи сигнала, с	ГЭР с АВЗС		Оптический тахометр	
	частота вращения ротора, об/мин	скольжение, о.е	частота вращения ротора, об/мин	скольжение, о.е
20	1492,4	0,0052	1492±0,7	0,0055
10	1492,4	0,0052		
8	1492,4	0,0052		
5	1492,5	0,0051		
3	1492,6	0,00512		
2	1492,8	0,005		
1,5	1491,7	0,0057		
1	1456,9	0,0289		

Таблица 4.7. Значения скольжения и частоты двигателя ФН-9

Время записи сигнала, с	ГЭР с АВЗС		Оптический тахометр	
	частота вращения ротора, об/мин	скольжение, о.е	частота вращения ротора, об/мин	скольжение, о.е
20	1487,6	0,0079	1487,6±0.7	0,0079
10	1487,2	0,0081		
8	1487,2	0,0081		
5	1487,6	0,0078		
3	1488,1	0,0075		
2	1485,8	0,0091		
1,5	1478,2	0,0142		
1	1473	0,0177		

Результаты измерений, представленные табл. 4.4, 4.5 и табл. 4.6, 4.7 наглядно показывают, что применение алгоритма АВЗС дает реальный положительный эффект, который выражается в уменьшении времени записи сигнала без потери точности определения частот гармонических составляющих.

#### **4.6. Проверка критерия определения качества регистрируемого сигнала**

В главе 3 был определен критерий (3.43) для оценки достоверности определения скольжения АД по ГЭР, который выглядит следующим образом:

$$\left| s_{\text{Э.изм}}^{1+} - s_{\text{Э.изм}}^{1-} \right| \leq \frac{p(\Delta f_c \cdot 2 + \Delta f_{\text{Э}}^{1+} + \Delta f_{\text{Э}}^{1-})}{(f_{c.m} - \Delta f_c)}$$

Этот критерий было предложено использовать для оценки качества регистрируемого сигнала. Если скольжение по ГЭР 1-го порядка будет определено с допустимой погрешностью, то можно сделать вывод, что сигнал пригоден к использованию, в противном случае необходимо повторить регистрацию сигнала.

Проверка эффективности работы критерия проводилась на реальных высоковольтных и низковольтных двигателях, при этом рассматривались два случая:

1. дефект записи сигнала;
2. изменение нагрузки АД.

На рис. 4.23 показана форма сигнала с ДХ, установленного на корпусе АД №2 стенда. Данный сигнал имеет дефект, вызванный некорректной работой оборудования записи.

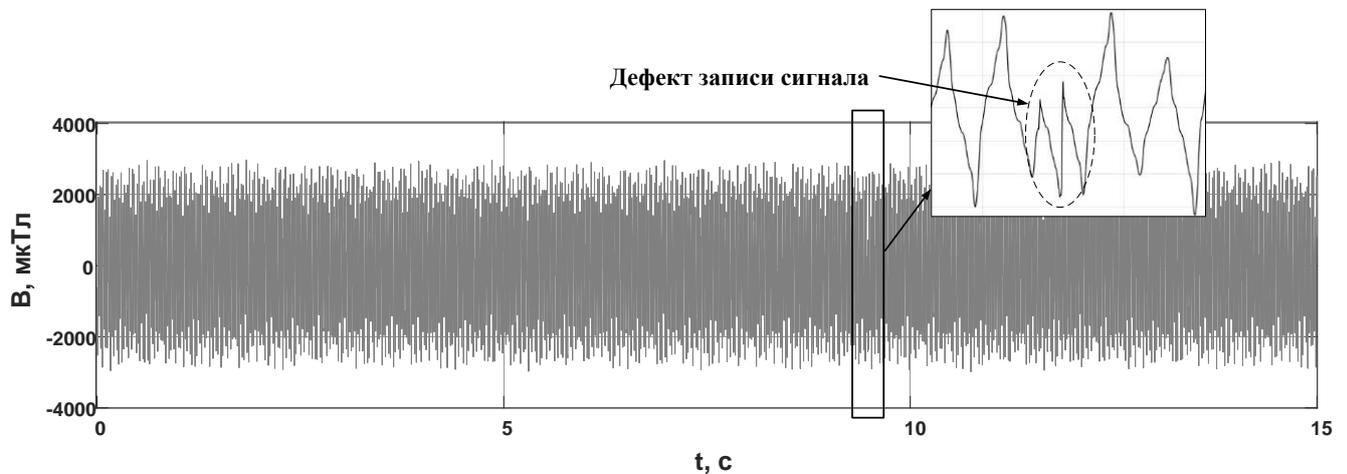
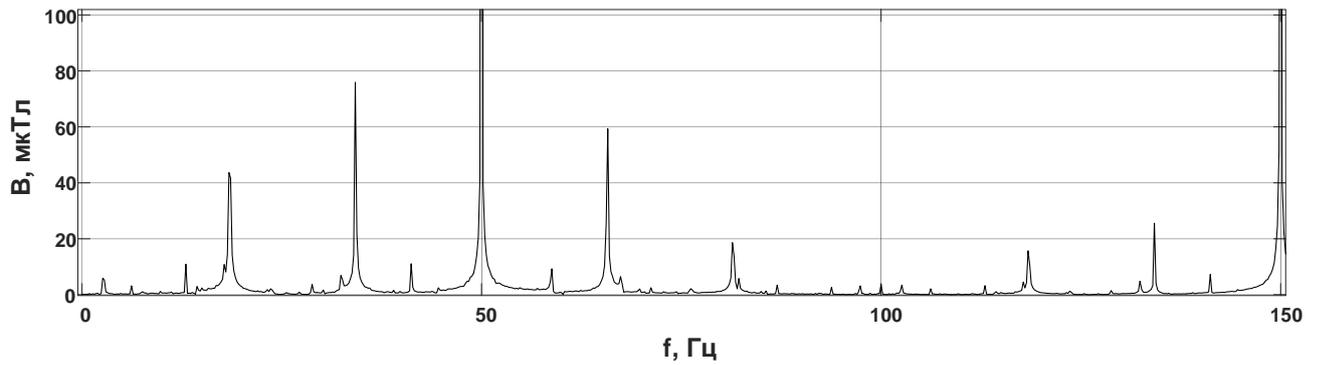


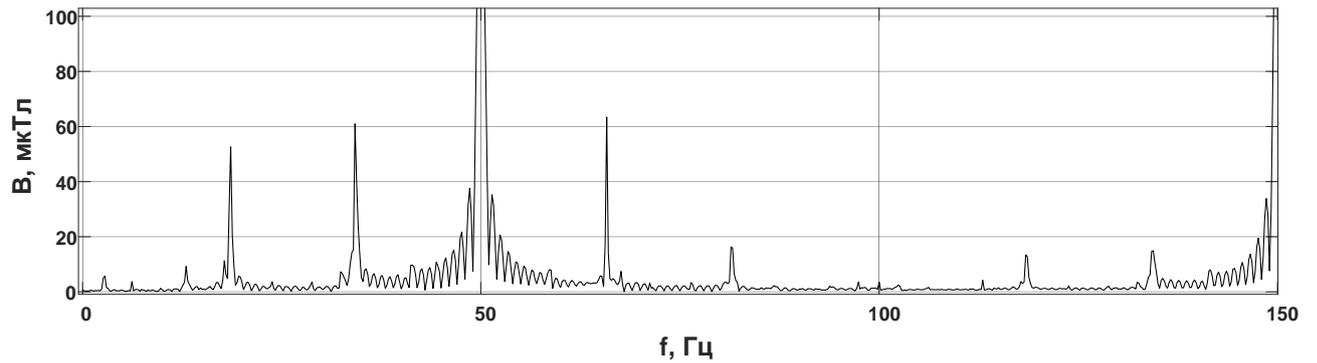
Рис. 4.23. Форма поврежденного сигнала с ДХ на корпусе АД №2

В качестве иллюстрации негативного влияния дефектов сигнала, на рис. 4.24 показаны спектры сигнала с ДХ на корпусе АД №2 (см. рис. 4.23), при этом на рис. 4.24, *а* показан спектр на отрезке 0–5 с. (без дефектов), а на рис. 4.24, *б* – на отрезке 5–10 с. (имеется дефект записи).

Как показывает рис. 4.24, *б* даже небольшие дефекты записи могут приводить к существенному "загрязнению" спектра. В спектре появляется множество дополнительных гармоник, которые могут значительно исказить результаты спектрального анализа. То есть отслеживать качество регистрируемого сигнала очень важно.



а)



б)

Рис. 4.24. Спектр сигнала с ДХ на корпусе АД №2:

а – отрезок 0–5 с.; б – отрезок 5–10 с.

На рис. 4.25 показана форма сигнала с ДХ, установленного на корпусе АД №2 стенда при ступенчатом изменении нагрузки на валу ротора, при этом нагрузка изменялась от холостого хода, до 120 % от номинального значения. Необходимо отметить, что индукция ВМП при увеличении нагрузки уменьшается.

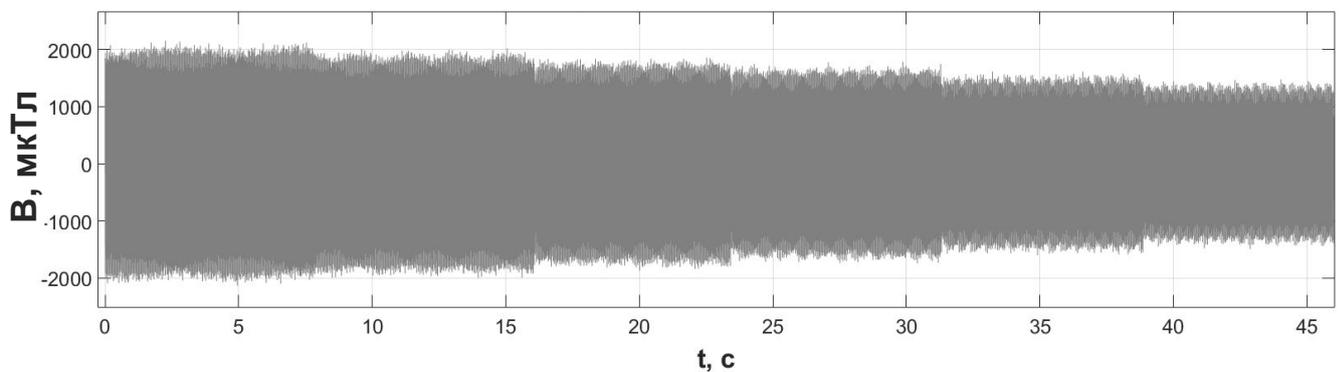


Рис. 4.25. Форма сигнала с ДХ на корпусе АД №2 при ступенчатом изменении нагрузки

На рис. 4.26 показана форма сигнала с ДХ, установленного на корпусе АД ДАМСО-15-12-8 дымососа 2А ИвТЭЦ-2 при внезапном незначительном уменьшении нагрузки на валу ротора.

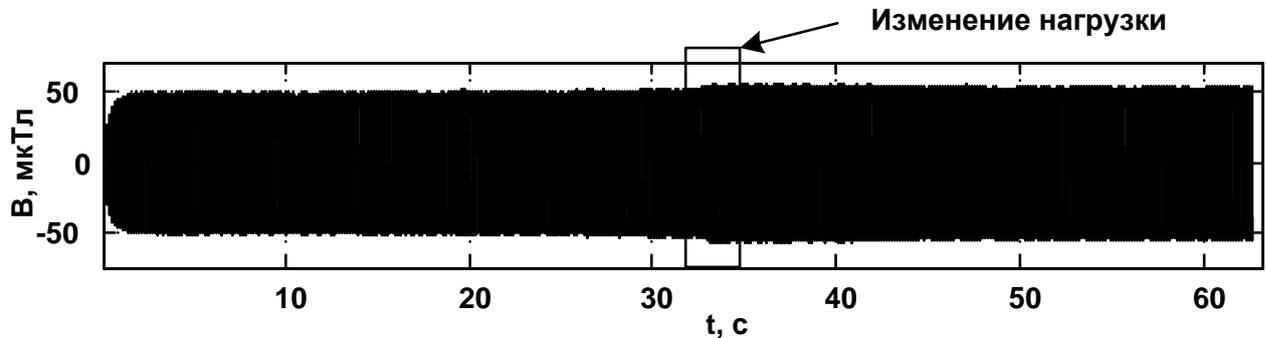


Рис. 4.26. Форма сигнала с ДХ на корпусе АД ДАМСО-15-12-8 дымососа 2А ИвТЭЦ-2 при изменении нагрузки на валу ротора

Далее был произведен анализ представленных сигналов. В каждом из них были выделены отрезки одинаковой продолжительности. Далее для каждого отрезка сигнала было произведено сравнение величины разности скольжений  $|s_{\text{Э.УЗМ}}^{1+} - s_{\text{Э.УЗМ}}^{1-}|$ , определенных по частотам ГЭР1- и ГЭР1+ с допустимым значением. Результаты расчетов представлены в табл. 4.8.

Как показывают результаты, представленные в табл. 4.8, условие (3.43) выполняется на тех отрезках сигналов, на которых отсутствуют дефекты. На отрезках 5–10 с. рис. 4.23 (имеется дефект записи сигнала), 30–35 с. рис. 4.25 (изменение нагрузки на валу ротора), 30–40 с. рис. 4.26 (изменение нагрузки на валу ротора) полученная разность скольжений  $|s_{\text{Э.УЗМ}}^{1+} - s_{\text{Э.УЗМ}}^{1-}|$  превысила максимально допустимое значение  $\Delta s_{\text{Э.макс}}$ , то есть условие (3.43) не выполнялось.

Таблица 4.8. результаты расчета критерия оценки достоверности определения скольжения

Двигатель	Отрезок сигнала, с	Значение скольжения по ГЭР 1-	Значение скольжения по ГЭР 1+	Величина разности скольжений, $ s_{Э.изм}^{1+} - s_{Э.изм}^{1-} $	Допустимая разность скольжений, $\Delta s_{Э.макс}$
<b>Дефект записи сигнала</b>					
АД №2	0–5	0,0660	0,0661	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	5–10	0,0653	0,0659	$8,13 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	10–15	0,0660	0,0661	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
<b>Изменение нагрузки</b>					
ДАМСО-15-12-8	20–30	0,005835	0,005829	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$
	30–40	0,005795	0,005886	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$7,28 \cdot 10^{-5}$
	40–50	0,005658	0,005841	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$7,28 \cdot 10^{-5}$
АД №2	25–30	0,0280	0,0282	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	30–35	0,0402	0,0399	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	33–38	0,0413	0,0413	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$

*Примечание. Серым цветом выделены значения разности скольжений, которые превышают максимально допустимые значения (критерий (3.43) не выполняется)*

Полученные результаты показывают, что критерий оценки достоверности определения скольжения АД по ГЭР (3.43), можно также использовать для определения качества регистрируемого сигнала.

#### **4.7. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя с поврежденной обмоткой ротора**

Для проверки корректности моделирования ВМП был произведен сравнительный анализ виртуальных и реальных сигналов с ДХ. Реальные сигналы с ДХ были получены на стендах №1 и №2.

Необходимо отметить, что на стенде №2 измерения производились не на одном АД, а на трех однотипных двигателях типа АИР71А6 производства ОАО

«Могилевский завод «Электродвигатель». Это сделано для того, чтобы оценить естественный разброс параметров АД в рамках одной серии и ответить на вопрос, насколько корректно распространять результаты измерений ВМП, полученные на одном двигателе, на целую серию. Двигатели обозначены как АИР №1, АИР №2, АИР №3. АД были поочередно установлены на стенд №2 (рис. 4.27), где с помощью ДХ производилась регистрация их ВМП. Сначала измерения производились при исправной ОР, а затем при одном оборванном стержне.

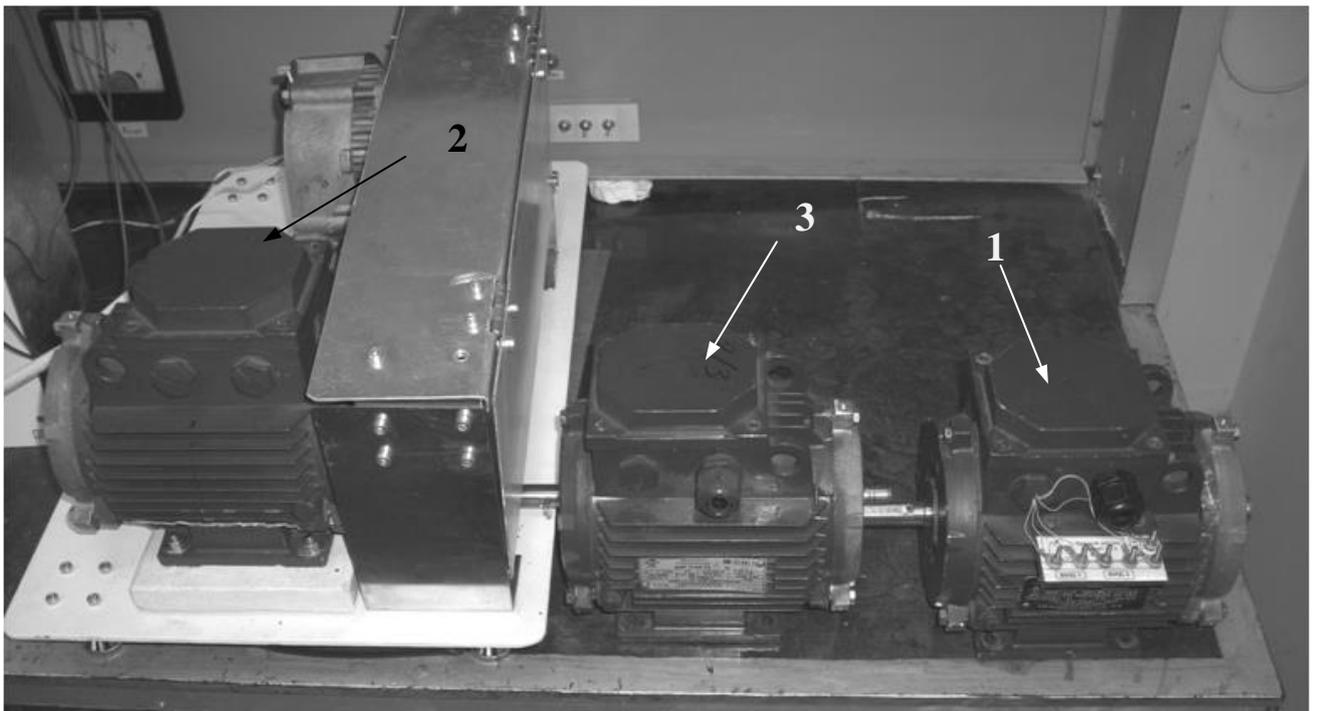


Рис. 4.27. Асинхронные двигатели типа АИР71А6:  
1 – АИР №1 (АД №2); 2 – АИР №2; 3 – АИР №3

В качестве виртуальных сигналов использовались сигналы, полученные на конечноэлементных моделях АД №1 и №2 с динамическим эксцентриситетом ротора 10 %. При моделировании учитывалась реальная нагрузка на валу ротора АД №1 и №2 и величина напряжения питающей сети (см. Прил. 2).

Моделирование АД №1 было выполнено при номинальной нагрузке на валу ротора и напряжении питания 220 В в каждой фазе.

Моделирование АД №2 было выполнено при нагрузке на валу ротора 80 % от номинальной и напряжении питания 230 В в каждой фазе.

На рис. 4.28, 4.29 показано сравнение форм сигналов с ДХ АД №1 и №2, соответственно, полученных на математической модели с учетом эксплуатационных факторов (рис. 4.28, а, в и рис. 4.29, а, в) и на экспериментальном стенде (рис. 4.28, б, г и рис. 4.29, б, г).

Как можно заметить виртуальные сигналы с ДХ АД №1 и №2 довольно точно повторяют реальные сигналы. Обрыв одного стержня ОР (рис. 4.28, в, г и рис. 4.29, в, г) не приводит к явным изменениям сигнала.

Далее с помощью анализатора спектра был произведен спектральный анализ виртуальных и реальных сигналов с ДХ, определялись значения амплитуд гармоник на частотах соответствующих гармоникам ФОР. Так же для гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  и  $\Phi OP_{\nu+}$  по выражению (2.3) определялись средние мощности  $P_{\Phi OP-}$  и  $P_{\Phi OP+}$ .

**Примечание.** При определении средней мощности не учитывались гармоники ФОР, порядок которых равен числу пар полюсов.

На рис. 4.30 показаны амплитудные спектры реальных и виртуальных сигналов с ДХ АД №1, представленных на рис. 4.28.

В табл. 4.9, 4.10 представлены амплитуды и средняя мощность, гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  и  $\Phi OP_{\nu+}$  АД №1, полученных с ДХ при номинальной нагрузке на валу ротора в сравнении с результатами математического моделирования.

На графиках, представленных на рис. 4.31–4.34 показаны амплитуды гармоник ФОР АД №1, относительно значений, полученных на математической модели. На рис. 4.31, 4.33 показаны графики для ИОР, а на рис. 4.32, 4.34 – для ПОР.

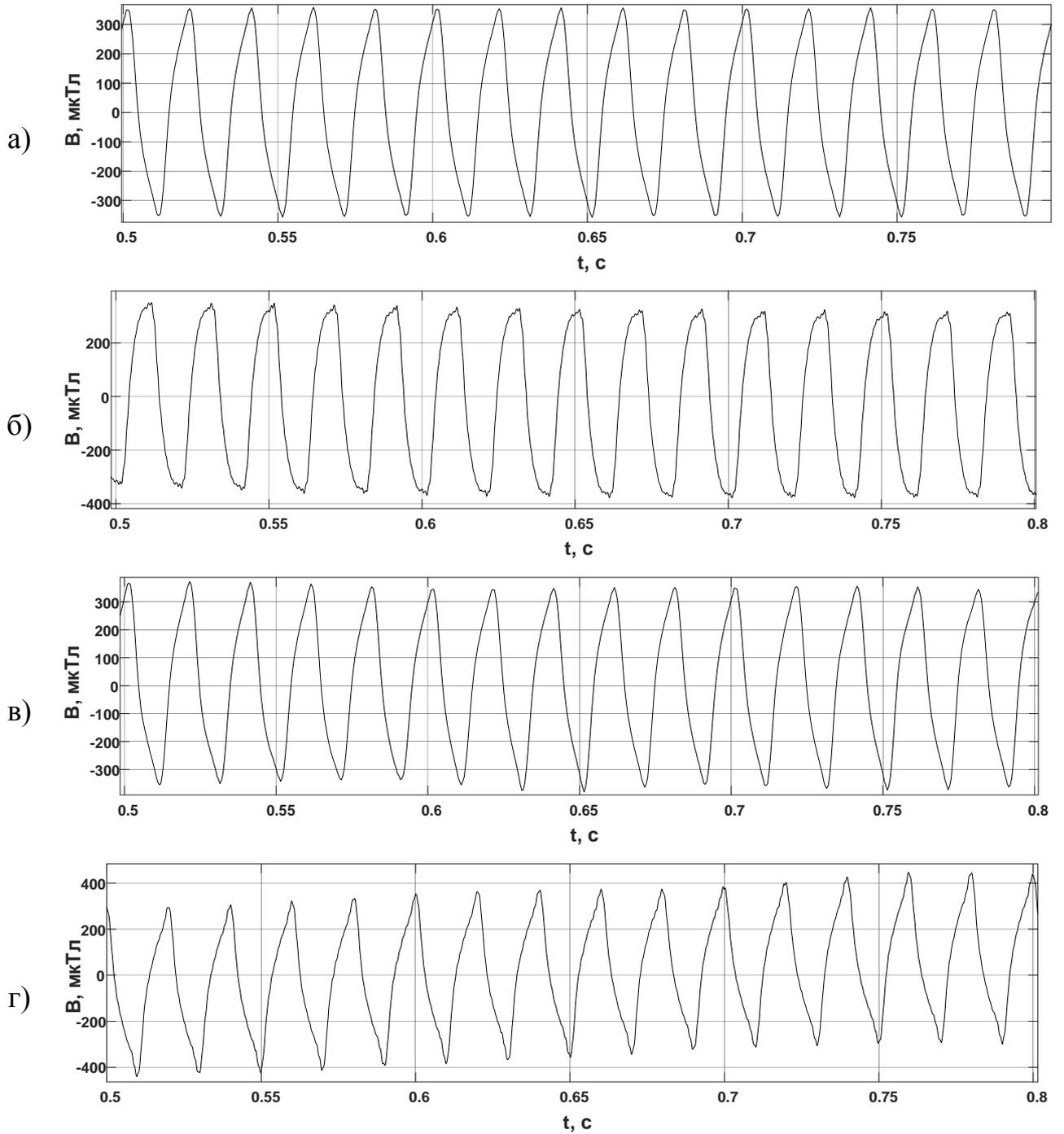


Рис. 4.28. Форма сигнала с ДХ АД №1 при номинальной нагрузке:

- а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

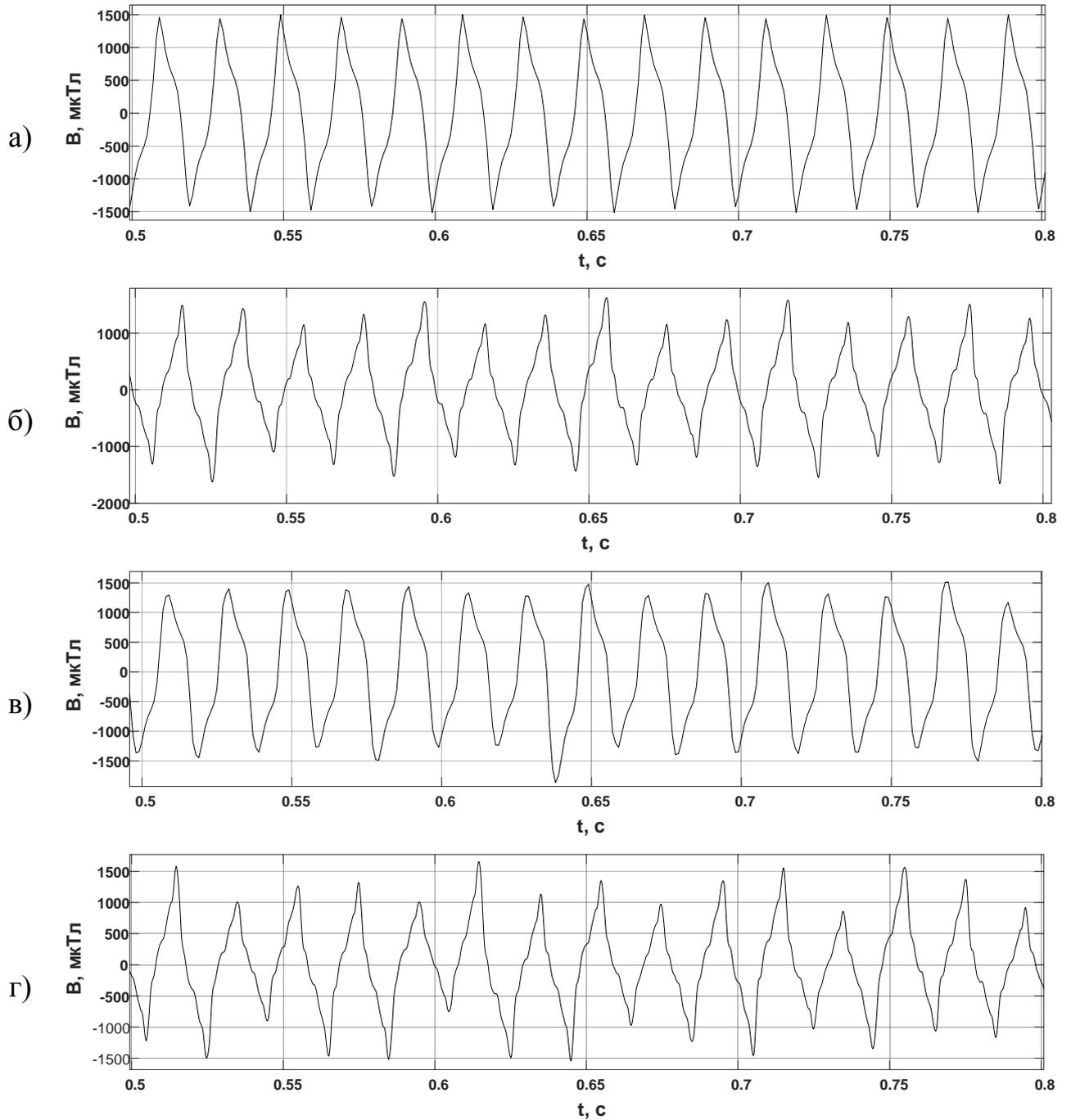


Рис. 4.29. Форма сигнала с ДХ АД №2 при нагрузке 80 % от номинальной:

- а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

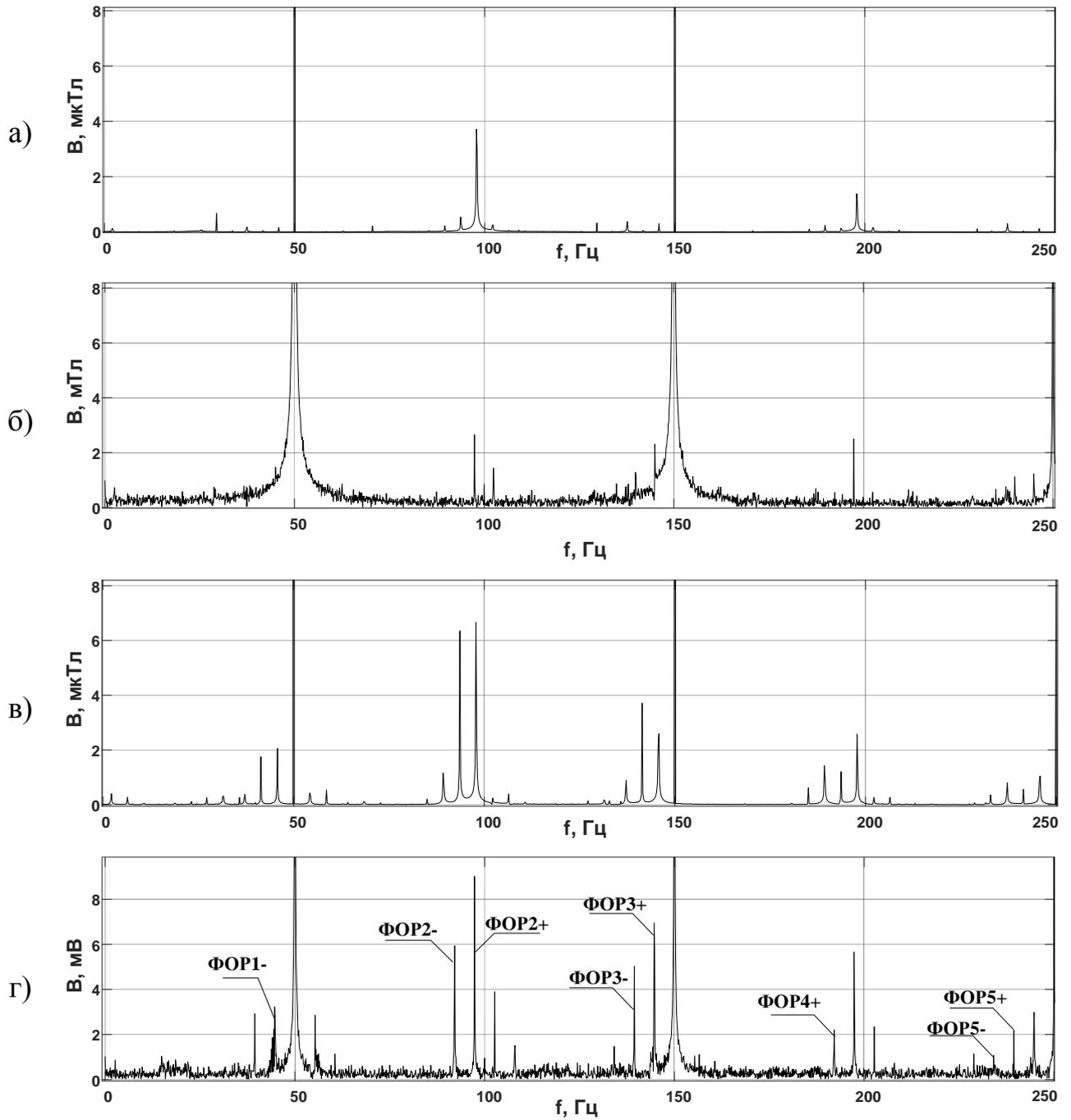


Рис. 4.30. Спектры сигналов с ДХ АД №1 при номинальной нагрузке:

- а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

Таблица 4.9. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP\nu-$  АД №1, полученные с ДХ при номинальной нагрузке на валу ротора

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	Р <sub>иОР</sub>	Р <sub>пОР</sub>	Р <sub>пОР</sub> / Р <sub>иОР</sub>
							мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
<b>Физическая модель АД №1</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	0,50	0,39	0,42	0,55	0,55	0,47	31,50	67,49
<b>ВпОР</b>	мкТл	3,30	6,04	4,90	0,96	1,26			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	6,60	15,49	11,67	1,75	2,29			
<b>Математическая модель АД №1</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	0,26	0,28	0,19	0,16	0,26	0,10	31,04	298,86
<b>ВпОР</b>	мкТл	2,00	6,37	4,03	2,00	1,12			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	12,53	8,08	63,23	5,83	2,67			

Таблица 4.10. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP\nu+$  АД №1, полученные с ДХ при номинальной нагрузке на валу ротора

Порядок гармоники ФОР		1+/ $f_c$	2+	3+	4+	5+	Р <sub>иОР</sub>	Р <sub>пОР</sub>	Р <sub>пОР</sub> / Р <sub>иОР</sub>
							мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
<b>Физическая модель АД №1</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	346,80	2,70	1,40	0,50	0,90	5,16	74,46	14,45
<b>ВпОР</b>	мкТл	345,30	8,91	7,30	2,80	2,90			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	1,00	3,70	5,20	5,60	2,10			
<b>Математическая модель АД №1</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	334,63	4,1	0,33	0,19	0,13	8,48	34,59	4,08
<b>ВпОР</b>	мкТл	335,12	6,72	4,76	1,01	0,58			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	1	1,3	8,13	6,2	4,2			

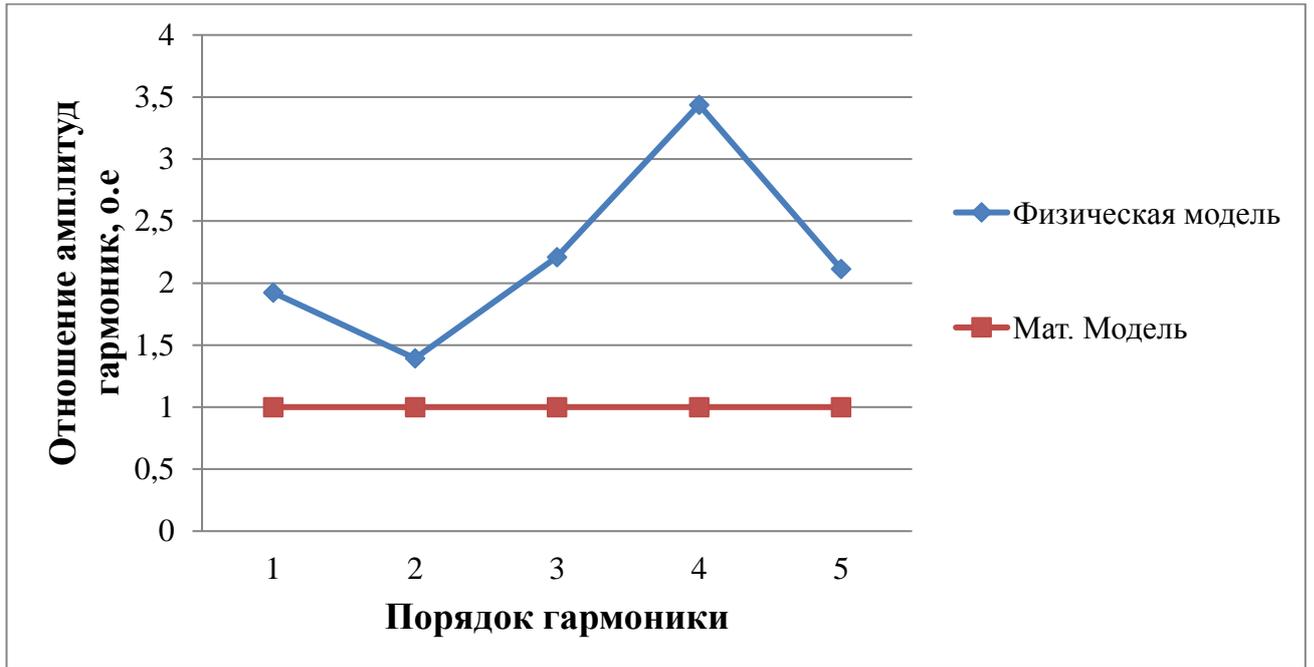


Рис. 4.31. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OPv$ - АД №1 при исправной обмотке ротора

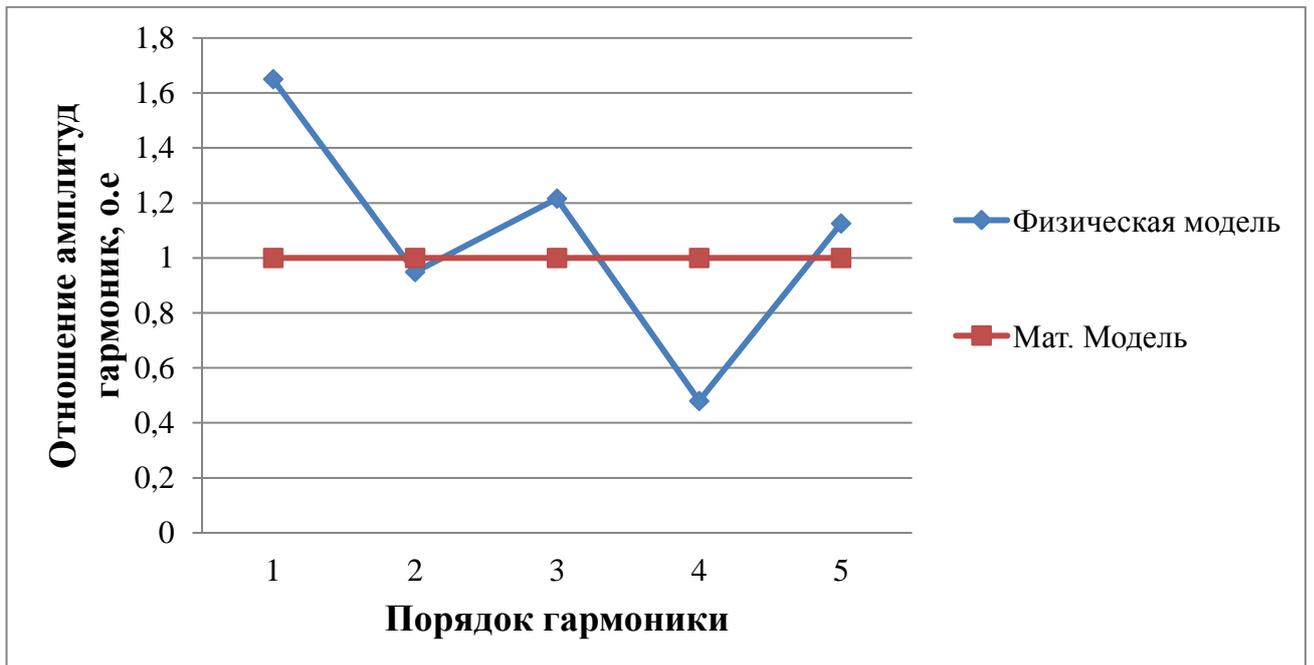


Рис. 4.32. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OPv$ - АД №1 при одном оборванном стержне в обмотке ротора

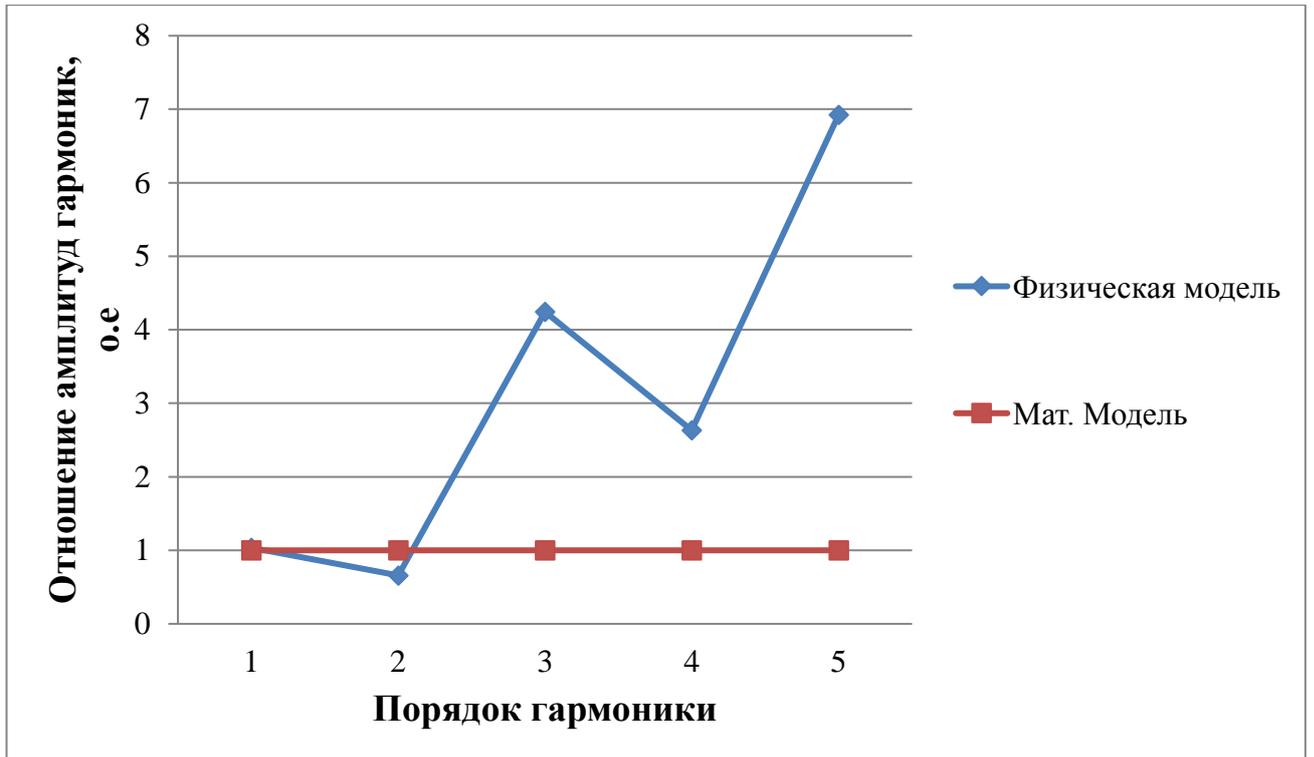


Рис. 4.33. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  АД №1 при исправной обмотке ротора

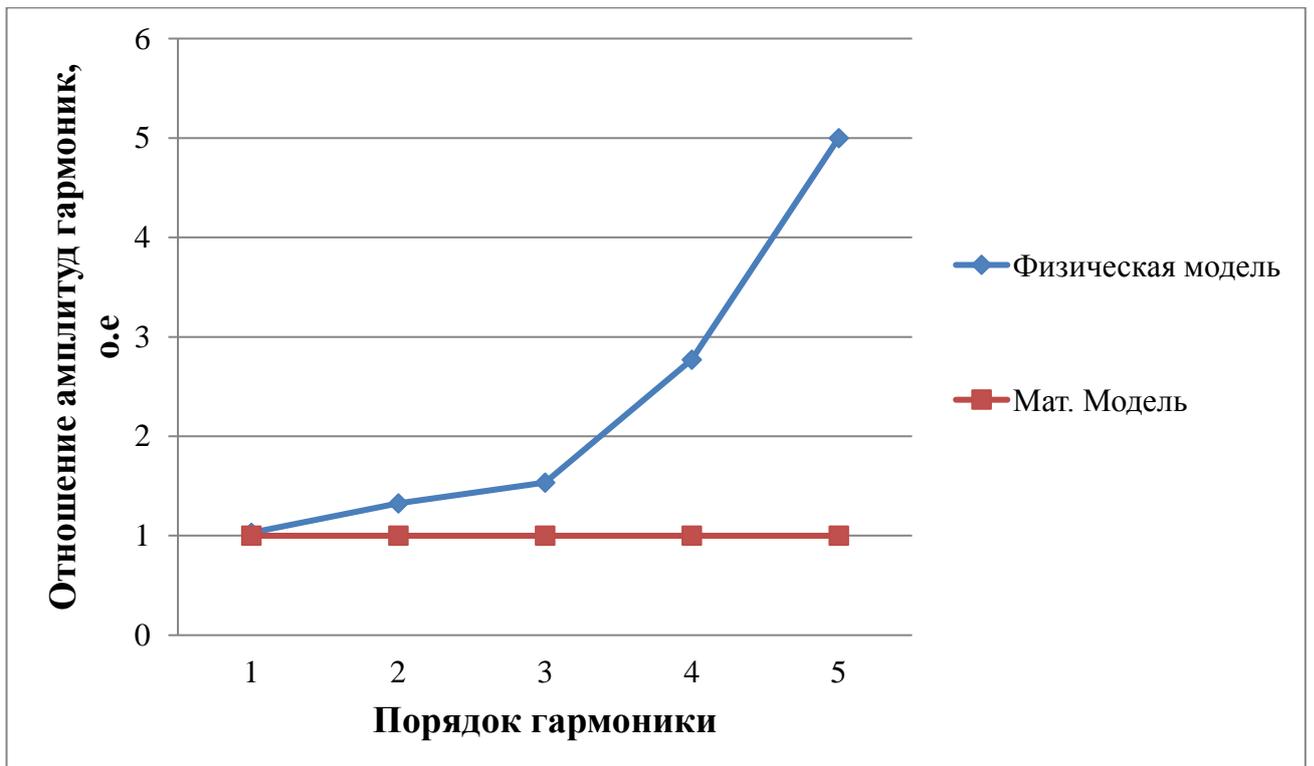


Рис. 4.34. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OPv+$  АД №1 при одном оборванном стержне в обмотке ротора

На рис. 4.35 показаны амплитудные спектры реальных и виртуальных сигналов с ДХ АД №2 (АИРН№1), представленных на рис. 4.29.

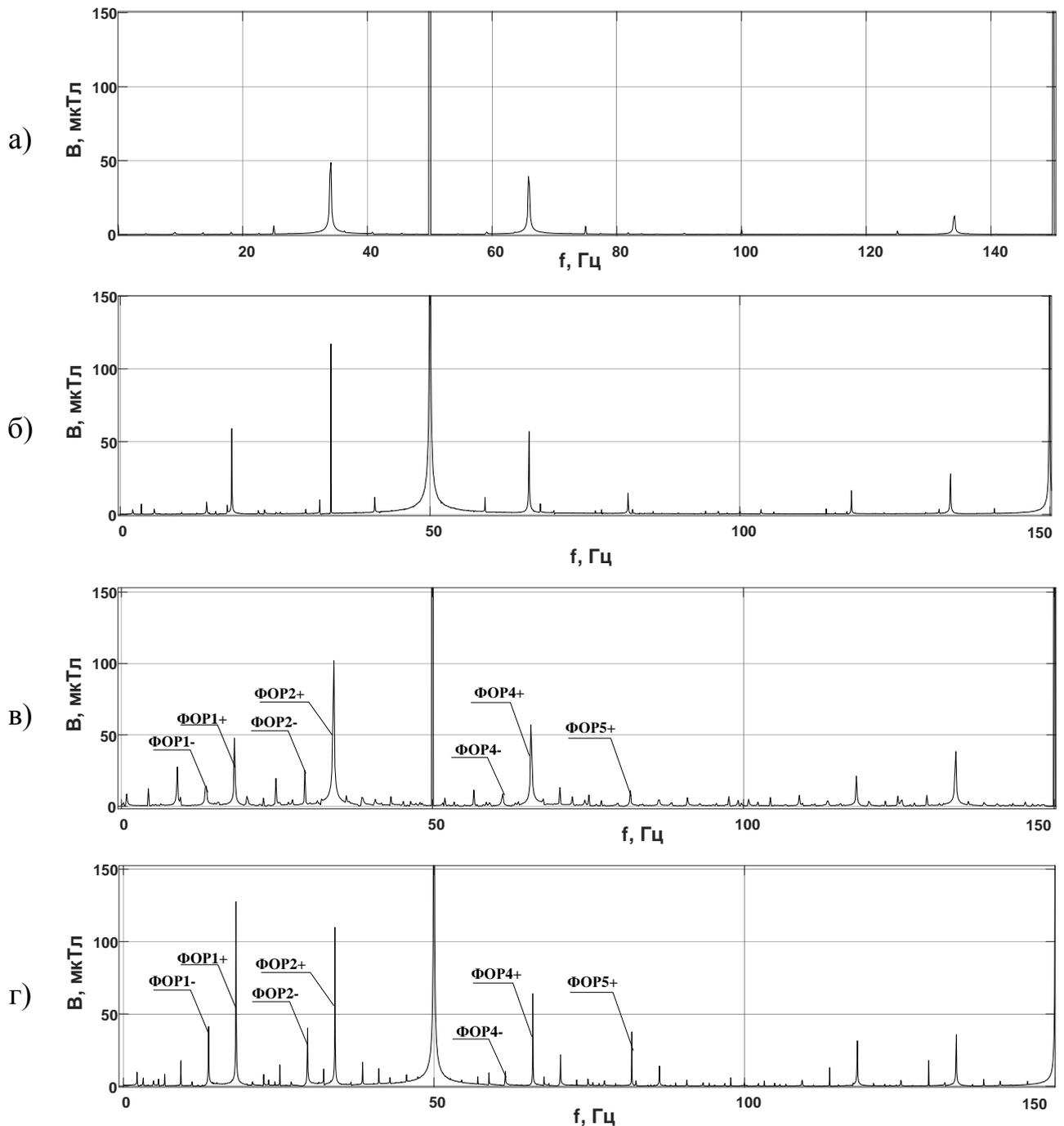


Рис. 4.35. Спектры сигналов с ДХ АД №2 при нагрузке 80% от номинальной:  
а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

В табл. 4.11, 4.12 представлены амплитуды и средняя мощность, гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  и  $\Phi OP_{\nu+}$  АИР №1–№3, полученных с ДХ при номинальной нагрузке на валу ротора в сравнении с результатами математического моделирования.

Таблица 4.11. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  АИР №1–№3, полученные с ДХ при нагрузке на валу ротора 80% от номинальной

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	Р <sub>иОР</sub>	Р <sub>пОР</sub>	Р <sub>пОР</sub> / Р <sub>иОР</sub>
							мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
<b>АИР №1</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	10,25	3,22	1,61	0,84	0,61	59,60	1925,59	32,31
<b>ВпОР</b>	мкТл	42,46	43,18	4,89	12,37	5,55			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	4,14	13,41	3,04	14,73	9,10			
<b>АИР №2</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	6,30	3,28	1,64	2,37	0,93	29,81	841,69	28,24
<b>ВпОР</b>	мкТл	25,26	30,87	3,40	8,03	5,28			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	4,01	9,41	2,07	3,39	5,68			
<b>АИР №3</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	7,04	2,68	4,82	2,58	4,82	54,91	2595,44	47,27
<b>ВпОР</b>	мкТл	52,84	48,88	4,86	3,03	0,62			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	7,51	18,24	1,01	1,17	0,13			
<b>Математическая модель АД №2</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	2,43	2,66	1,22	0,98	1,19	7,69	634,17	82,49
<b>ВпОР</b>	мкТл	18,53	27,44	3,41	12,44	4,14			
<b>ВпОР/ ВиОР</b>	о.е.	7,62	10,31	2,80	26,02	3,47			

Таблица 4.12. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP_{\nu+}$  АИР №1–№3, полученные с ДХ при нагрузке на валу ротора 80% от номинальной

Порядок гармоники ФОР		1+	2+	3+/ $f_c$	4+	5+	Р <sub>ИОР</sub>	Р <sub>ПОР</sub>	Р <sub>ПОР</sub> / Р <sub>ИОР</sub>
							мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	о.е.
<b>АИР №1 (АД №2)</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	58,2	110,9	1304,6	80,1	17,4	11208,1	18352,1	1,6
<b>Впор</b>	мкТл	131,1	117,3	1307,6	66,1	37,4			
<b>Впор/ ВиОР</b>	о.е.	2,3	1,1	0,9	0,8	2,1			
<b>АИР №2</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	61,11	52,39	1151,99	35,12	21,79	4093,49	5918,97	1,45
<b>Впор</b>	мкТл	78,63	63,14	1115,75	31,74	25,73			
<b>Впор/ ВиОР</b>	о.е.	1,29	1,21	0,87	0,9	1,18			
<b>АИР №3</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	85,51	117,51	1768,34	71,08	32,33	13608,69	21844,23	1,61
<b>Впор</b>	мкТл	136,61	137,19	1714,75	67,46	40,66			
<b>Впор/ ВиОР</b>	о.е.	1,6	1,17	0,97	0,95	1,26			
<b>Математическая модель АД №2</b>									
<b>ВиОР</b>	мкТл	3,27	72,85	1511,89	58,40	2,65	4367,50	13097,45	3,00
<b>Впор</b>	мкТл	52,37	132,44	1637,81	76,02	11,52			
<b>Впор/ ВиОР</b>	о.е.	16,04	1,82	1,08	1,30	4,36			

На графиках, представленных на рис. 4.36–4.39 показаны амплитуды гармоник ФОР АИР №1–№3, относительно значений, полученных на математической модели. На рис. 4.36, 4.38 показаны графики для ИОР, а на рис. 4.37, 4.39 – для ПОР.

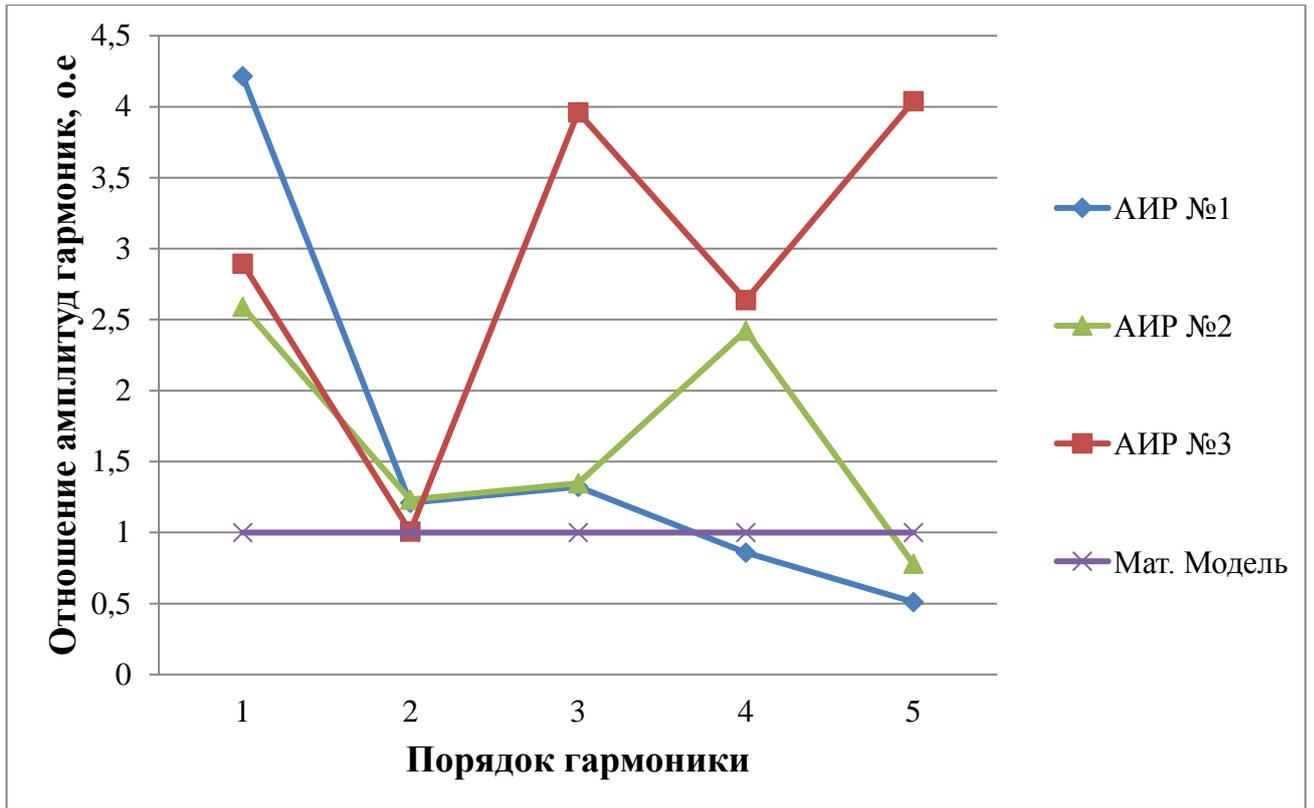


Рис. 4.36. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OP\nu$ - АИР №1–№3 при исправной обмотке ротора

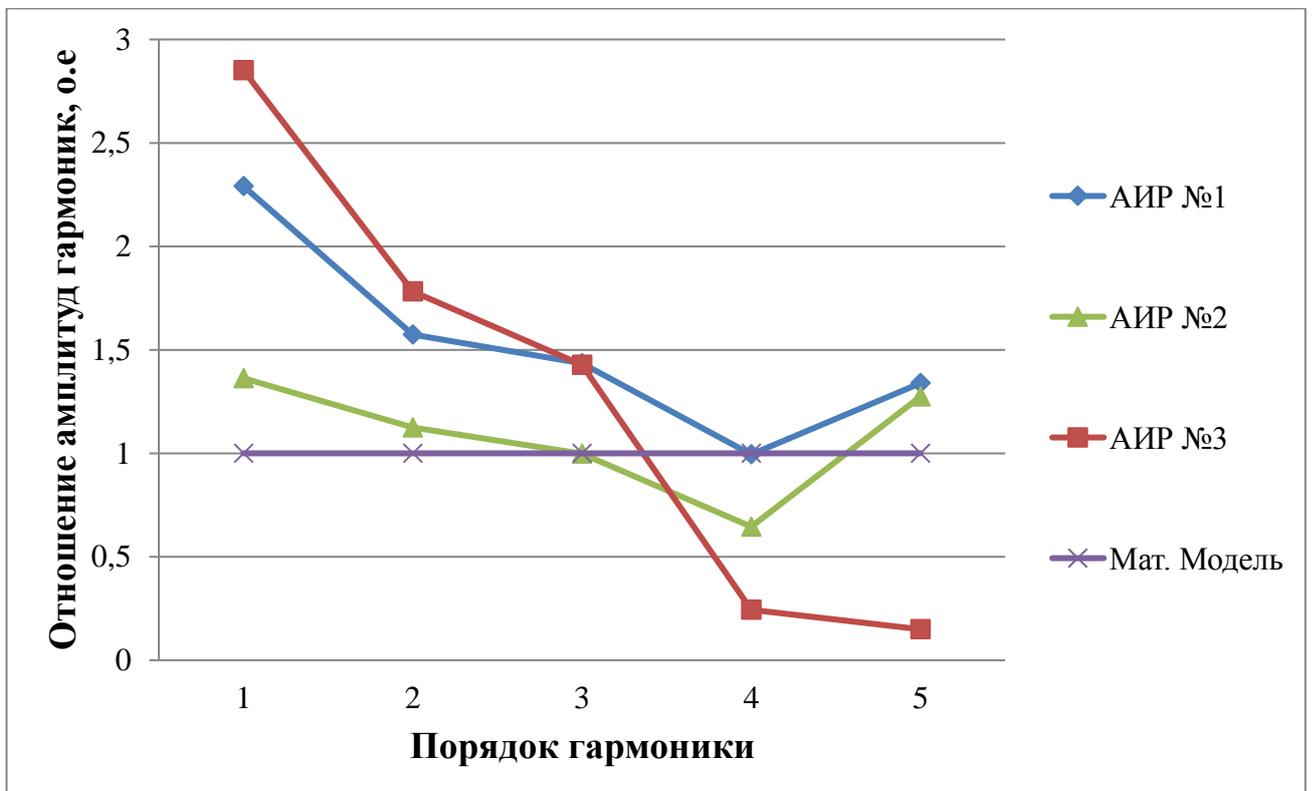


Рис. 4.37. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OP\nu$ - АИР №1–№3 при одном оборванном стержне в обмотке ротора

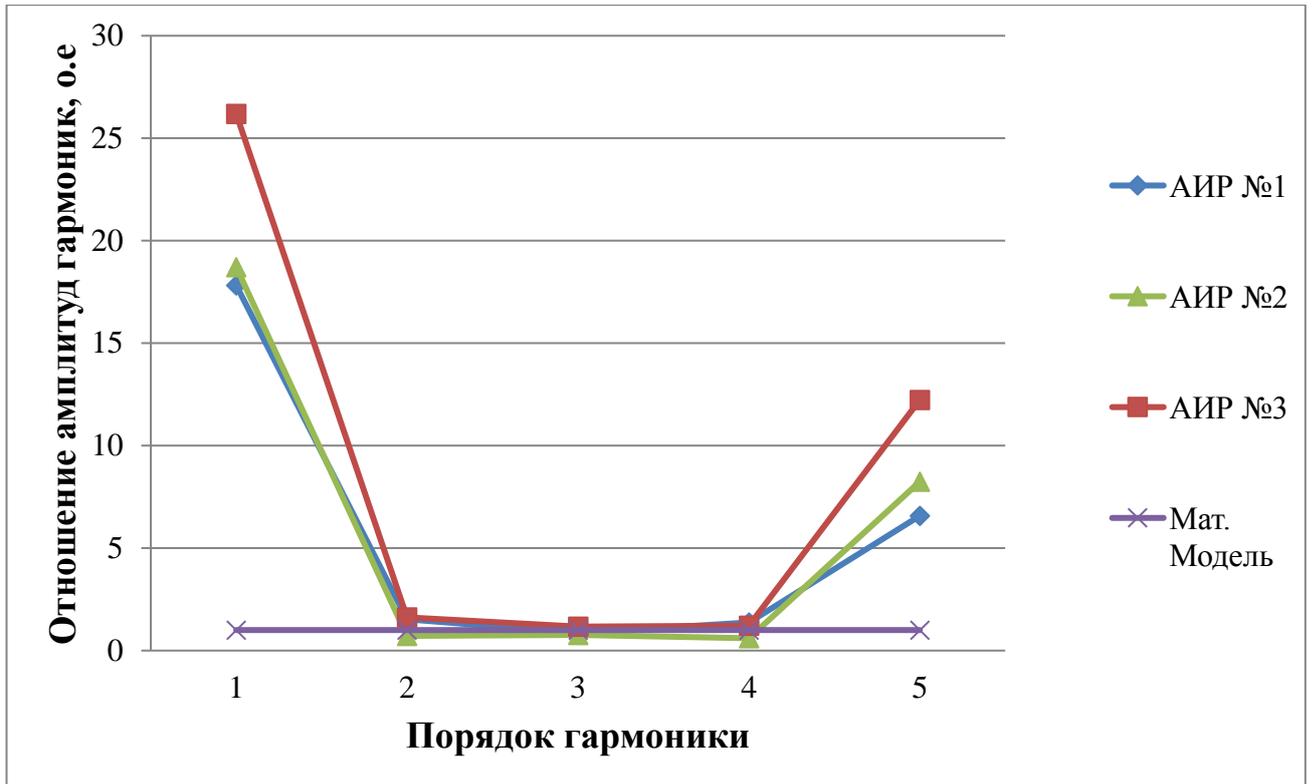


Рис. 4.38. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АИР №1–№3 при исправной обмотке ротора

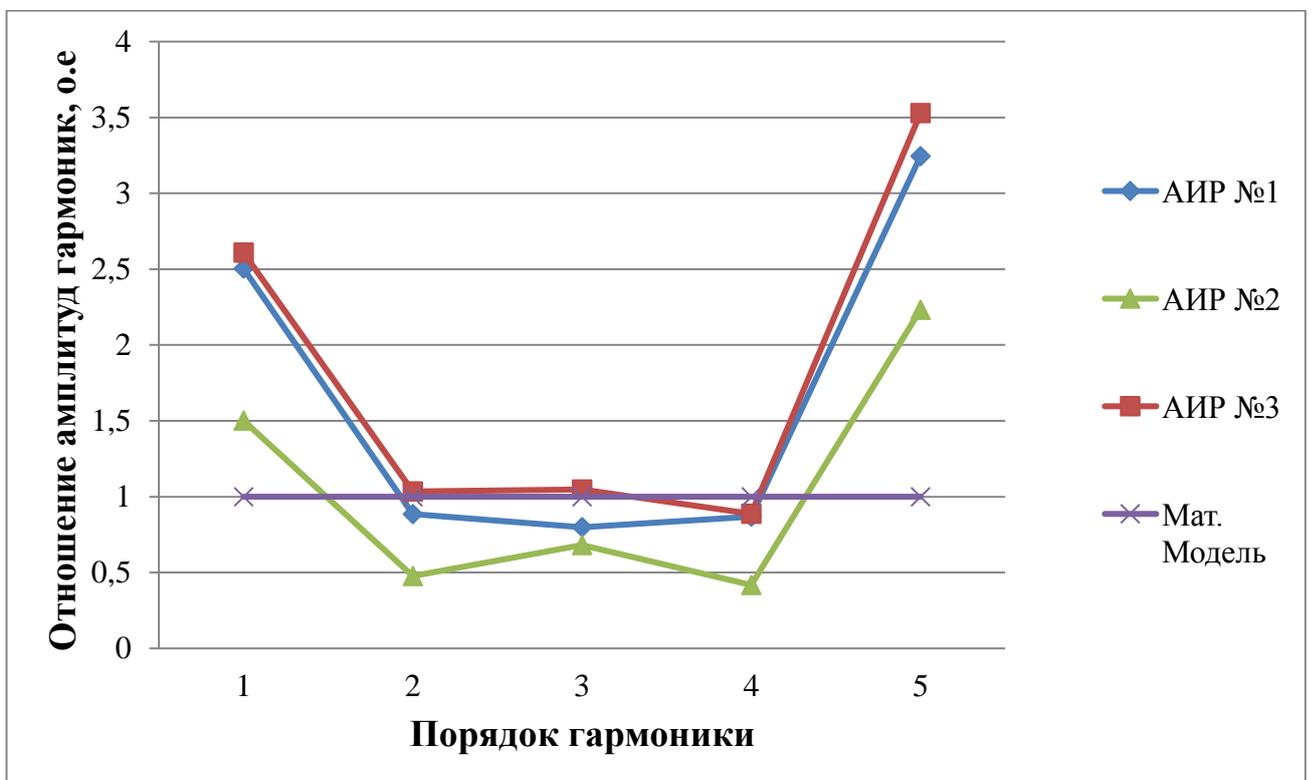


Рис. 4.39. Отношения амплитуд гармоник  $\Phi OP_{v+}$  АИР №1–№3 при одном оборванном стержне в обмотке ротора

Как видно из рис. 4.30, 4.35 и табл. 4.9–4.12 обрыв стержня обмотки ротора существенно влияет на спектр ВМП АД №1 и АД №2 (АИР №1–№3). В целом прослеживаются те же изменения, что и в сигналах с датчиков ВИД (см. Прил. 3). Обрыв стержня ОР приводит к существенному увеличению амплитуд гармонических составляющих с частотой, которая совпадает с частотами гармоник ФОР, определяемых выражением (1.1). Таким образом, можно считать доказанным факт существования гармоник ФОР в радиальной составляющей ВМП АД.

Наибольший рост продемонстрировали гармоники  $\Phi OP_{\nu-}$ , амплитуды некоторых гармоник при обрыве стержня ОР возросли более чем в 10 раз. Амплитуды гармоник  $\Phi OP_{\nu+}$  при обрыве стержня ОР увеличивались не столь значительно. Полученные экспериментальные результаты подтверждают сделанный в главе 2 вывод о том, что для определения состояния ОР наиболее целесообразно использовать гармоники  $\Phi OP_{\nu-}$ .

Интересны результаты, полученные на трех однотипных АД АИР №1–№3 (табл. 4.11–4.12, рис. 4.36–4.39). Все три двигателя имеют близкие рабочие параметры (см. Прил. 2). Однако результаты спектрального анализа ВМП показали, что гармоники ФОР одного порядка этих АД могут иметь более чем двукратную разницу амплитуд. При этом на АИР №1 и АИР №3 амплитуды гармоник ФОР имеют весьма близкие значения, на АИР №2 амплитуды гармоник ФОР несколько ниже. Таким образом, полученный разброс значений амплитуд гармоник ФОР можно считать естественным. Двукратную разницу значений амплитуд гармоник ФОР одного порядка следует считать допустимой.

Анализ результатов, представленных в табл. 4.9–4.12, а также на рис. 4.31–4.34 и рис. 4.36–4.39 показывает, что имеется довольно большой разброс между результатами экспериментов и данными математического моделирования. Амплитуды некоторых гармоник могут отличаться в несколько раз.

Как и в случае с сигналами с датчиков ВИД (см. Прил. 3), наибольшую разницу амплитуд демонстрируют гармоники  $\Phi OP_{\nu+}$  при ИОР (рис. 4.31, 4.33 и рис. 4.36, 4.36). Особенно это выражено на АД №2 (АИР №1–№3). Столь

значительное расхождение результатов, вероятно, обусловлено эксцентриситетом ротора и естественной несимметрией ОР.

Разница амплитуд гармоник ФОР реальных и виртуальных сигналов с ДХ при одном оборванном стержне ОР (рис. 4.32, 4.34 и рис. 4.37, 4.39) уменьшается. Как и в случае с сигналами с датчиков ВИД меньше всего разница для гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$ .

На АД №1 при одном оборванном стержне ОР (рис. 4.32, 4.34) относительная разница амплитуд реальных и виртуальных сигналов для большинства гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  не превышает 60%.

Разброс значений амплитуд сигналов, полученных с ДХ АИР №1–№3 и на математической модели АД №2 значительно больше, нежели в предыдущем случае. Наиболее близкие значения амплитуд гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  были получены на АИР №2. При этом относительная разница амплитуд реальных и виртуальных сигналов для не превышала 50%.

Относительная разница амплитуд для АИР №1, №3 и математической модели, для большинства гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  не превышает 2 раз, что, как было сказано ранее, можно считать допустимым результатом.

В главе 2 в качестве диагностического параметра обрыва стержней был предложен интегральный показатель – средняя мощность сигнала, состоящего из гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  (2.6)

$$P_{\Phi OP-} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^5 B_{\nu-}^2.$$

Полученные экспериментальные результаты подтверждают целесообразность такого решения.

При обрыве стержня ОР средняя мощность сигнала, состоящего из гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$  увеличивается в несколько десятков раз (см. табл. 4.9, 4.12).

Средняя мощность сигнала, состоящего из гармоник  $\Phi OP_{\nu+}$  при обрыве стержня ОР увеличивается не значительно (см. табл. 4.10, 4.11). При этом результаты, полученные на физической и математической моделях, сильно отличаются.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Полученные экспериментальные результаты подтверждают сделанный в главе 2 вывод о том, что для определения состояния ОР наиболее целесообразно использовать гармоники  $\Phi OP_{\nu-}$ .

2. Амплитуды гармоник ФОР ВМП одностипных АД, работающих в одинаковых условиях, могут существенно различаться. Двукратную разницу значений амплитуд гармоник ФОР одного порядка можно считать допустимой и результаты математического моделирования вполне соответствуют этому разбросу.

3. Ввиду выявленной флуктуации значений амплитуд гармоник ФОР одностипных АД подтверждается целесообразность применения в качестве диагностического параметра интегрального показателя – средней мощности сигнала, состоящего из гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$ .

4. Учет динамического эксцентриситета ротора при математическом моделировании положительно сказывается на точности результатов определения амплитуд гармоник  $\Phi OP_{\nu+}$  и практически не влияет на амплитуды гармоник  $\Phi OP_{\nu-}$ . Отсюда следует, что для определения пороговых значений диагностического признака наличия обрыва стержней ОР АД учитывать эксцентриситет не имеет смысла.

5. Результаты экспериментов показывают, что конечноэлементные модели, реализованные в Ansys Maxwell, позволяют получить корректные результаты при моделировании радиальной составляющей ВМП АД с оборванным стержнем ОР и могут быть использованы на практике для определения пороговых значений диагностического признака наличия обрыва стержней ОР.

## 4.8. Разработка методики функциональной диагностики обмотки ротора асинхронного электродвигателя по внешнему магнитному полю

По результатам проведенных исследований предлагается методика диагностирования ОР АД на основе спектрального анализа ВМП, основные особенности которой показаны на рис. 4.40.

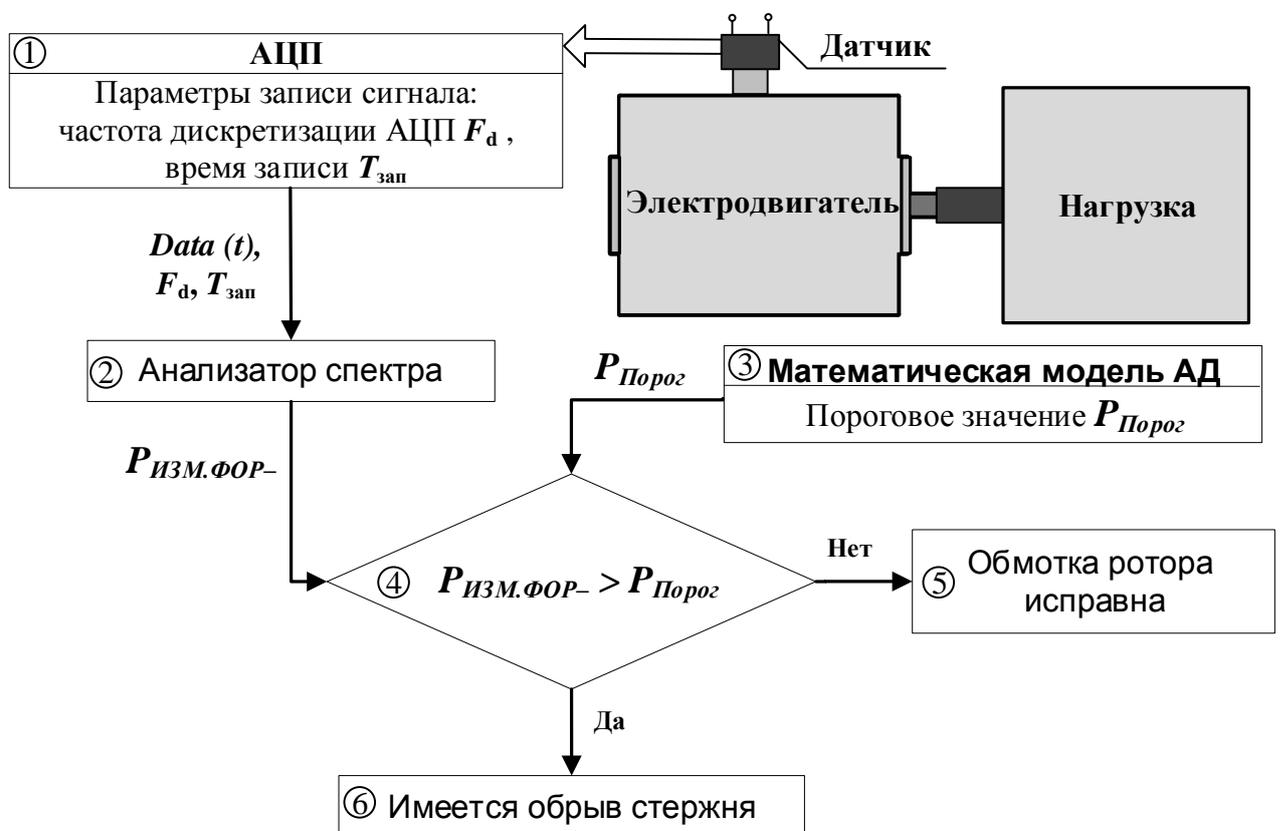


Рис. 4.40. Структурная схема алгоритма диагностирования ОР АД по ВМП

На корпусе АД производится регистрация радиальной составляющей индукции ВМП (рис. 4.40, блок 1). Регистрация сигнала должна производиться в одной точке корпуса в области середины длины сердечника статора и на противоположной от клеммной коробки стороне корпуса. Точка, в которой производятся измерения, должна быть отмечена краской. Далее, с помощью анализатора спектра, производится спектральный анализ зарегистрированного

сигнала и определяется величина диагностического параметра  $P_{ИЗМ.ФОР-}$  – средней мощности сигнала, состоящего из гармоник  $ФОРν-$  (рис. 4.40, блок 2).

Для определения наличия оборванных стержней в ОР АД измеренное значение  $P_{ИЗМ.ФОР-}$  сравнивается с пороговым значением  $P_{Порог}$  (рис. 4.40, блок 4). Если измеренное значение средней мощности больше порогового, то делается вывод о наличии оборванного стержня в ОР (рис. 4.40, блоки 5 и 6).

$$P_{ИЗМ.ФОР-} \geq P_{Порог}. \quad 4.1$$

При регулярном проведении процедуры диагностики и накоплении статистики, граничные значения диагностических параметров должны уточняться.

Результаты исследований, проведенные в данной работе, показали, что конечноэлементные модели ВМП АД с одним оборванным стержнем ОР дают приемлемую точность результатов, поэтому в том случае, если данные измерений по конкретному типу АД отсутствуют, то есть пороговые значения диагностического параметра заранее неизвестны, то они могут быть определены с помощью математического моделирования (рис. 4.40, блок 3).

Для получения пороговых значений диагностического параметра  $P_{Порог}$  предлагается следующая методика.

1. Создание конечноэлементной модели АД с ИОР. Для этого требуются исходные данные, перечень, которых представлен в Прил. 1. Должна учитываться текущая нагрузка АД.

2. Проверка корректной работы модели. Скольжение (частота вращения) и ток статора АД, полученные на модели, не должны отличаться от реальных показателей более чем на 10 %. Амплитуды гармоник ВМП на частоте сети не должны различаться более чем на 30 %.

3. Создание конечноэлементной модели АД с одним оборванным стержнем ОР.

4. Определение порогового значения диагностического параметра  $P_{Порог}$ . Определяется средняя мощность сигнала, состоящего из гармоник  $ФОРν-$ , полученная при одном оборванном стержне ОР –  $P_{ПОР}$ . С учетом возможной

неточности результатов математического моделирования пороговое значение будет определяться по следующему выражению:

$$P_{\text{Порог}} = 0,7 \cdot P_{\text{ПОР}}. \quad (4.2)$$

Для практической реализации методики функциональной диагностики короткозамкнутой ОР АД по ВМП разработан программно-аппаратный комплекс. Аппаратная часть комплекса состоит из трех элементов: системы регистрации ВМП, на основе ДХ (8 и 9 на рис. 4.3), АЦП (3 на рис. 4.3) и компьютера типа ноутбук. Внешний вид комплекса показан на рис. 4.6.

Сама методика диагностирования, представленная на рис. 4.40, реализована в виде компьютерной программы CRW [110].

Предложенная методика была опробована на ИвТЭЦ-2. Процедура диагностирования ОР производилась на высоковольтных АД типа ДАМСО 15-12-8 дымососов ДС-1А и ДС-2Б.

Параметры АД представлены в табл. 4.3, исходные данные для создания модели представлены в Прил. 1.

АД типа ДАМСО 15-12-8 имеет двойную беличью клетку, верхняя ОР выполнена из латуни, а нижняя – из меди. Обрывам стержней подвержена только верхняя, пусковая, обмотка. Геометрия модели АД ДАМСО 15-12-8 показана на рис. 4.41.

Для определения целевых режимных параметров (ток, частота вращения, амплитуды гармоники ВМП на частоте сети) были использованы данные измерений, проведенные на АД дымососов ДС-1А и ДС-2Б. Результаты измерения, представлены в табл. 4.13. Можно сделать вывод, что данные АД работают при нагрузке приблизительно 60 % от номинальной.

Исходя из полученных данных, было определено приблизительное значение момента сопротивления на валу ротора АД [96].

$$M_c = -0,6 \cdot 9550 \cdot \frac{P_{\text{НОМ.АД}}}{n}. \quad 4.3$$

Было выполнено моделирование АД типа ДАМСО 15-12-8 при нагрузке 60 % от номинальной, полученные значения целевых параметров представлены в табл. 4.14.

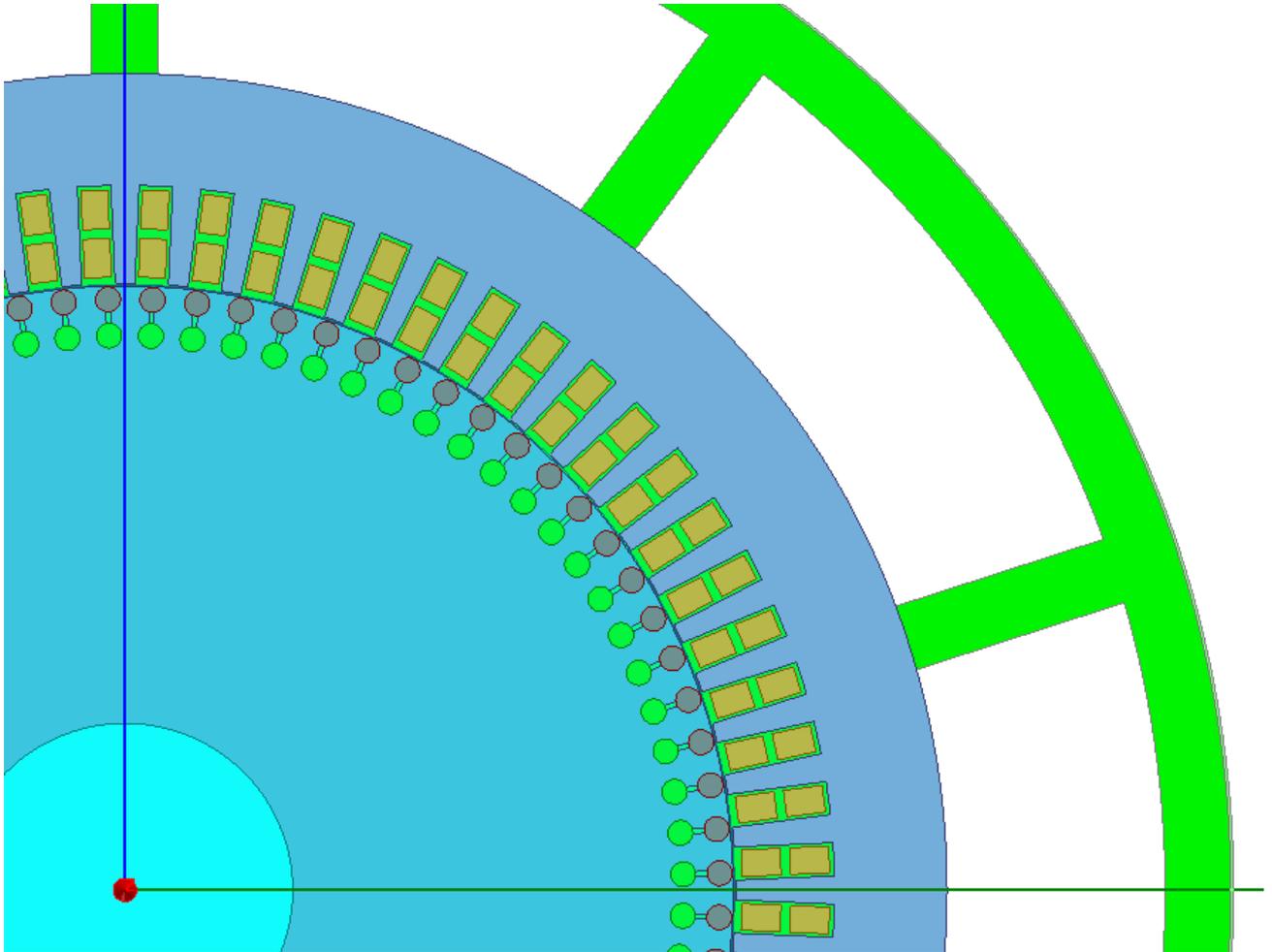


Рис. 4.41. Геометрия АД типа ДАМСО 1512-8 с двойной беличьей клеткой

Таблица 4.13. Целевые режимные параметры АД типа ДАМСО 15-12-8

Целевые параметры	Ток,	Частота	Амплитудное значение гармоники
	А	вращения, об/мин	ВМП на частоте сети, мкТл
	I	n	Вс
ДС-1А	40	744,7	36,837
ДС-2Б	40	744,2	38,355
Математическая модель	41	742,1	39,31

Полученные на математической модели АД с ИОР значения целевых режимных параметров отличаются менее чем на 10 % от реальных величин, что удовлетворяют условию 2.

Далее было произведено моделирование АД с одним оборванным стержнем верхней ОР. На рис. 4.42 показаны амплитудные спектры сигналов с ДХ, полученных на АД дымососов ДС-1А и ДС-2Б и математической модели моделирование АД с одним оборванным стержнем верхней ОР.

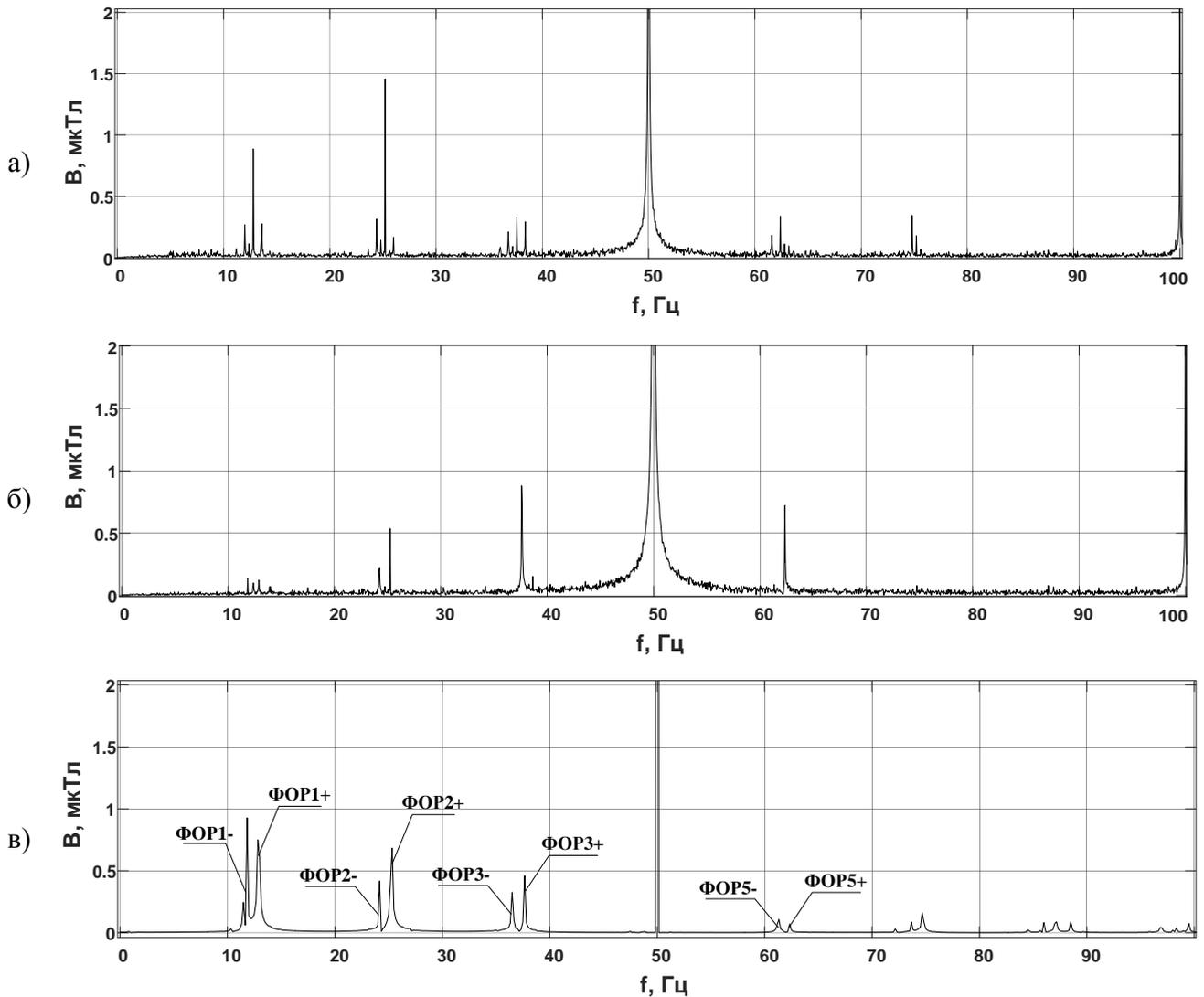


Рис. 4.42. Спектры сигналов с ДХ АД типа ДАМСО 15-12-8 при нагрузке 60 %:  
а – Двигатель дымососа ДС-1А (ТЭЦ); б – Двигатель дымососа ДС-2Б (ТЭЦ); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель)

В табл. 4.14 представлены амплитуды и средняя мощность, гармоник  $\Phi OP\nu$ - АД типа ДАМСО 15-12-8, полученных с ДХ при нагрузке 60% на валу ротора в сравнении с результатами математического моделирования.

На основании полученных результатов в табл. 4.14 проведена процедура определения технического состояния ОР АД типа ДАМСО 15-12-8.

Таблица 4.14. Амплитуды и средняя мощность гармоник  $\Phi OP\nu$ - ДАМСО 15-12-8 при нагрузке 60 %

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	$P_{\Phi OP-}$ мкТл <sup>2</sup>
<b>Двигатель дымососа ДС-1А ДАМСО 15-12-8</b>							
<b>Визм</b>	мкТл	0,315	0,410	0,227	-	0,239	<b>0,18</b>
<b>Двигатель дымососа ДС-2Б ДАМСО 15-12-8</b>							
<b>Визм</b>	мкТл	0,225	0,251	0,062	-	0,062	<b>0,061</b>
<b>Математическая модель ДАМСО 15-12-8 с одним оборванным стержнем ОР</b>							
<b>Визм</b>	мкТл	0,970	0,420	0,368	-	0,290	<b>0,668</b>

Измеренные значения диагностического параметра составили для АД ДС-1А  $P_{\text{Изм.ФОР-}} = 0,188$  [мкТл<sup>2</sup>] и для АД ДС-2Б  $P_{\text{Изм.ФОР-}} = 0,061$  [мкТл<sup>2</sup>].

В результате математического моделирования АД с одним оборванным стержнем ОР получено значение средней мощности  $P_{\text{ПОР}} = 0,668$  [мкТл<sup>2</sup>]. Пороговое значение диагностического параметра для АД типа ДАМСО 15-12-8 будет равно:  $P_{\text{Порог}} = 0,7 \cdot P_{\text{ПОР}} = 0,47$  [мкТл<sup>2</sup>].

Таблица 4.15. Определение технического состояния ОР АД типа ДАМСО 15-12-8

Объект диагностирования	$P_{\text{Изм.ФОР-}}$	$P_{\text{Порог}}$	Состояние ОР
	мкТл <sup>2</sup>	мкТл <sup>2</sup>	
Двигатель дымососа ДС-1А ДАМСО 15-12-8	0,18	0,47	Исправное
Двигатель дымососа ДС-2Б ДАМСО 15-12-8	0,061	0,47	Исправное

Полученные значения диагностических параметров  $R_{ИЗМ.ФОР}$  оказались значительно меньше порогового значения  $R_{Порог}$ . Это позволяет сделать вывод, что ОР АД дымососов ДС-1А и ДС-2Б находятся в исправном состоянии.

#### **Достоинства метода диагностирования ОР АД по ВМП.**

1. Неинвазивность. Не требуется установка датчиков внутри корпуса АД или в токовых цепях.
2. Позволяет выявить обрыв даже одного стержня ОР.
3. Не требует дорогостоящего оборудования.

#### **Ограничения и недостатки метода диагностирования ОР АД по ВМП.**

1. Проведение контроля возможно только на АД, работающих в установившемся режиме, что обусловлено ограничениями БПФ.
2. Низкая достоверность результатов контроля на АД, работающих в режимах, близких к холостому ходу, что обусловлено малыми токами в роторе.

По результатам разработки методики практической реализации функциональной диагностики ОР по ВМП были поданы две заявки на патент.

### **4.9. Оценка помехозащищенности внешнего магнитного поля как диагностического сигнала**

Важной характеристикой диагностического сигнала является его помехозащищенность. Наиболее вероятным источником электромагнитных помех, которые могут воздействовать на ВМП, являются другие АД. Для изучения влияния магнитных полей АД друг на друга был произведен ряд экспериментов.

Было произведено исследование изменений ВМП при его удалении от корпуса АД №2 экспериментального стенда. Для этого производилась непрерывная

регистрация сигнала с ДХ, который с интервалом 4-6 секунд последовательно удалялся от корпуса АД на 1 см. Форма полученного сигнала показана на рис. 4.43. Также в каждой точке определялись амплитуды гармоники частоты сети и ГЭР первого порядка. Результаты измерений представлены в табл. 4.16.

На рис. 4.43 показаны графики относительного изменения амплитуд (относительно значений, полученных на корпусе АД) гармоник ВМП на частоте сети и ГЭР1+ АД №2, полученные на экспериментальном стенде и математической модели.

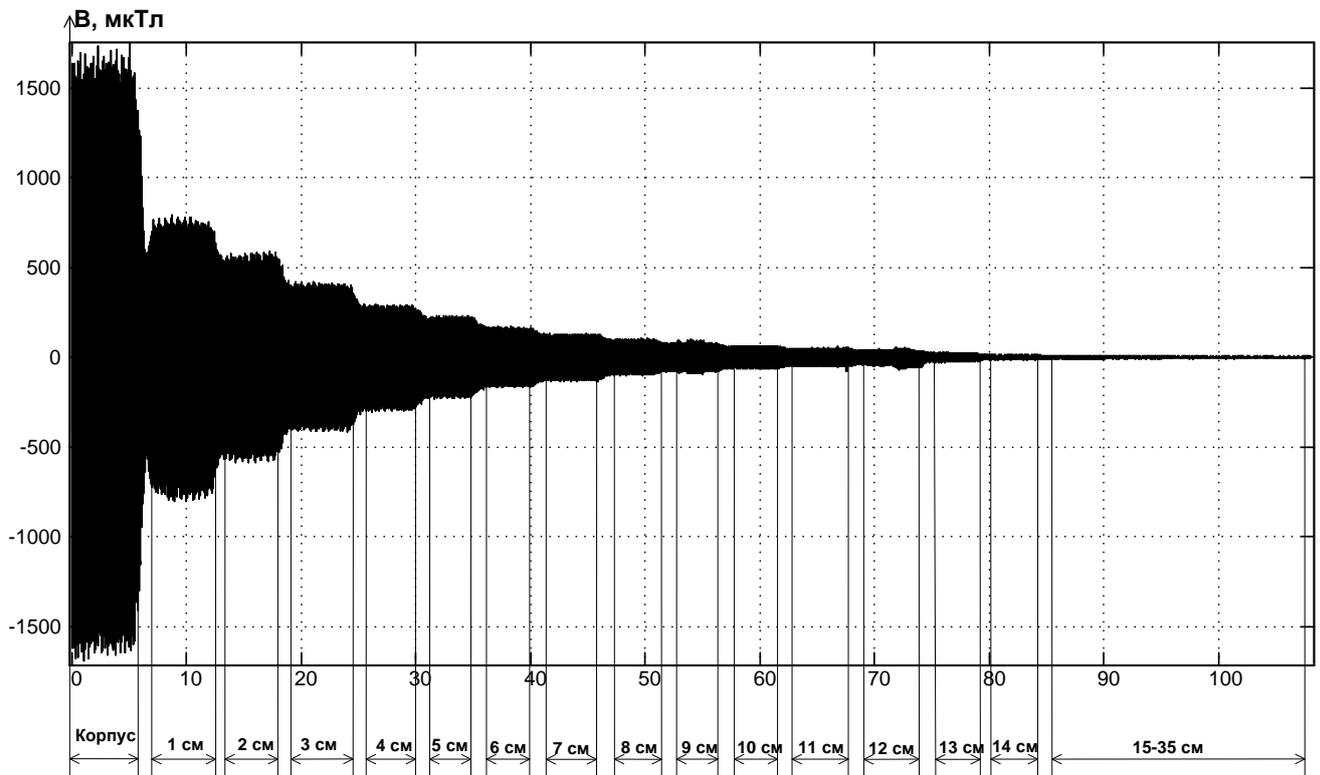


Рис. 4.43. Форма сигнала при удалении ДХ от корпуса электродвигателя  
(внизу отмечено расстояние до корпуса электродвигателя)

Полученные результаты показывают, что при удалении датчика на 1 см от корпуса АД амплитуда основной гармоники уменьшилась почти в 2 раза, а при его удалении на 35 см амплитуда основной гармоники становится неразличимой на фоне шума. В свою очередь, ГЭР первого порядка становятся неразличимыми в спектре уже на расстоянии более 10 см.

Таблица 4.15. Амплитуды гармоник ВМП при удалении датчика от корпуса АД экспериментального стенда

Расположение точки измерения	Амплитуда гармоники на частоте сети, мкТл	Амплитуда ГЭР1+, мкТл	Амплитуда ГЭР1-, мкТл
На корпусе двигателя	1369	68,44	41,4
1 см от корпуса	706	30,51	11,07
2 см от корпуса	515,8	15,18	5,469
3 см от корпуса	371,8	14,33	3,909
4 см от корпуса	266,3	9,958	2,357
5 см от корпуса	205,5	7,104	1,497
6 см от корпуса	150,7	5,003	0,8179
7 см от корпуса	117,1	3,859	0,5912
8 см от корпуса	85,66	2,877	0,456
9 см от корпуса	75,72	2,189	0,1875
10 см от корпуса	54,63	1,687	0,2057
11 см от корпуса	43,55	1,32	Неразличима в спектре (амплитуда около 0,1 мкТл)
12 см от корпуса	36,49	1,038	Неразличима в спектре
13 см от корпуса	20,08	0,5156	Неразличима в спектре
14 см от корпуса	9,144	0,2601	Неразличима в спектре
15 см от корпуса	4,301	Неразличима в спектре (амплитуда около 0,15 мкТл)	Неразличима в спектре
20 см от корпуса	2,789	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре
25 см от корпуса	2,614	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре
30 см от корпуса	1,685	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре
35 см от корпуса	1,219	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре

Результаты относительного изменения амплитуд, полученные на стенде и на математической модели, оказались очень близки, что позволяет сделать вывод о корректности результатов моделирования распространения ВМП в пространстве.

Полученные в лабораторных условиях результаты, подтверждают сделанный в главе 2 вывод, о том, что ввиду стремительного затухания ВМП даже в случае близкого расположения АД взаимное влияние их ВМП друг на друга будет крайне незначительным, так как амплитуды информативных гармоник слишком малы.

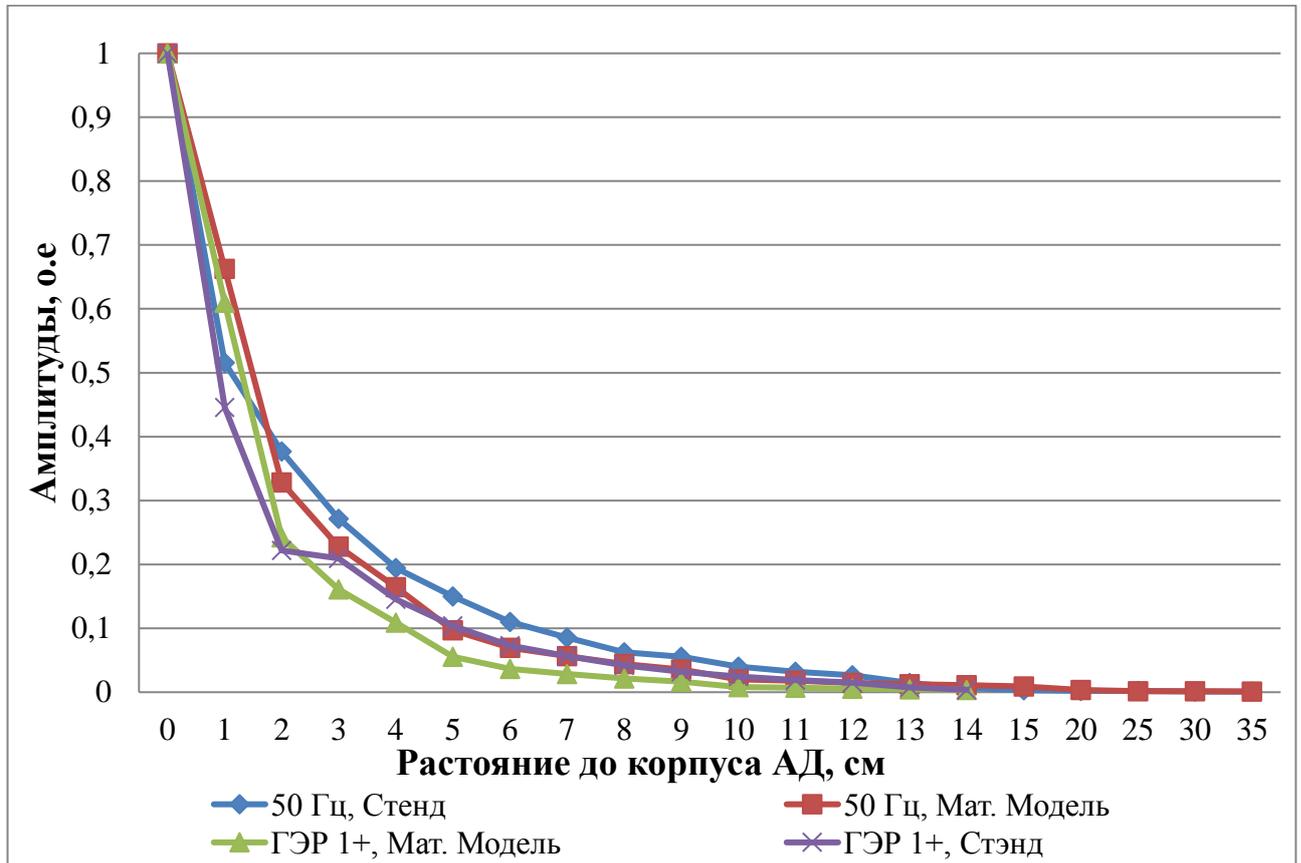


Рис. 4.43. Затухание гармоник ВМП при удалении от корпуса АД №2

Для практического подтверждения данного вывода, на ИвТЭЦ-2 и в котельной ИГЭУ было проведено исследование взаимного влияния ВМП соседних АД друг на друга.

На ИвТЭЦ-2 было произведено исследование изменения ВМП при его удалении от корпуса АД дымососа ДС-2А. При этом регистрация ВМП производилась на расстояниях 20 см, 50 см и 1 м от корпуса данного электродвигателя, а также на корпусе соседнего, отключенного АД дымососа ДС-1Б того же типа, который был расположен на расстоянии 4,5 м от исследуемого. В каждой точке определялись амплитуды гармоники частоты сети и ГЭР первого порядка. Результаты представлены в табл. 4.16. На рис. 4.44 показан план

размещения оборудования в дымососном отделении ИвТЭЦ-2, на 4.45 показано взаимное расположение исследуемых двигателей дымососов ДС-2А и ДС-1Б.

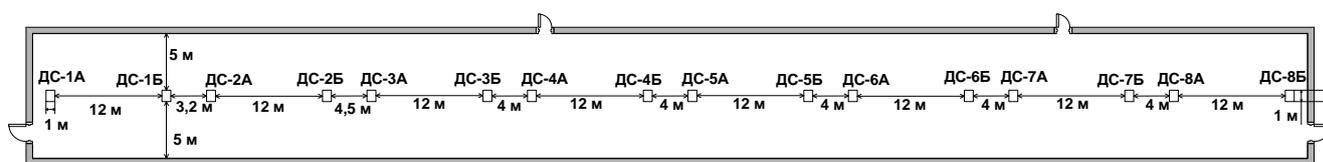


Рис. 4.44. План размещения оборудования в дымососном отделении ИвТЭЦ-2

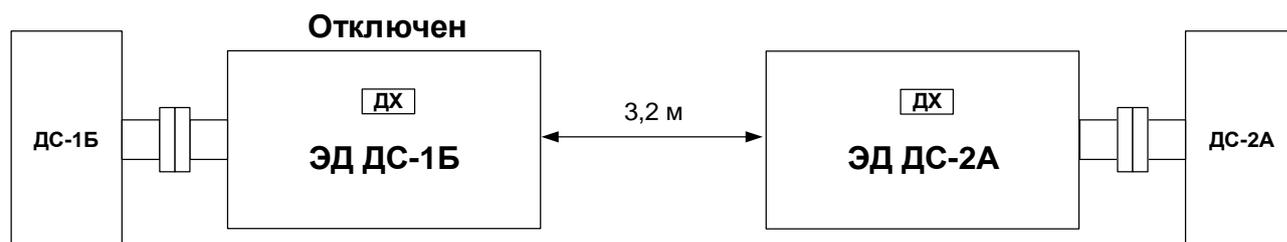


Рис. 4.45. взаимное расположение двигателей дымососов ДС-3А и ДС-2Б

Таблица 4.16. Амплитуды гармоник ВМП при удалении датчика от корпуса АД дымососа ДС-3А ИвТЭЦ-2

Расположение точки измерения	Амплитуда гармоники на частоте сети, мкТл	Амплитуда ГЭР1+, мкТл	Амплитуда ГЭР1-, мкТл
На корпусе АД ДС-2А	54,16	5,735	1,521
На расстоянии 20 см от корпуса АД ДС-2А	8,24	0,6043	0,367
На расстоянии 50 см от корпуса АД ДС-2А	4,94	0,271	0,1515
На расстоянии 100 см от корпуса АД ДС-2А	2,11	0,1794	0,1213
На корпусе АД ДС-1Б (при включённом АД ДС-2А)	0,1464	Неразличима в спектре (амплитуда шума около 0,05 мкТл)	Неразличима в спектре (амплитуда шума около 0,05 мкТл)
На корпусе АД ДС-1Б (при отключённом АД ДС-2А)	0,1469	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре

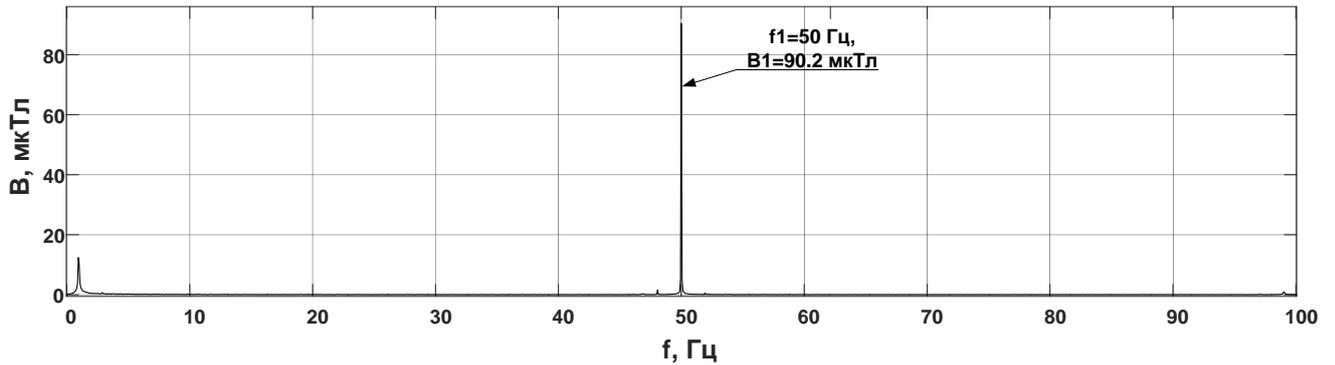
Из результатов, представленных в табл. 4.16 видно, что амплитуды каждой из рассматриваемых гармоник ВМП существенно уменьшаются при удалении датчика от корпуса двигателя и на расстоянии 1 метр становятся слабее как минимум в 10 раз. Вблизи корпуса соседнего неработающего АД гармоники ВМП практически неразличимы на фоне шума, уровень которого составил примерно 0,05 мкТл.

В котельной ИГЭУ измерения проводились на двигателях сетевых насосов №4–№6, при этом сетевые насосы №4 и №6 находились в работе, а сетевой насос №5 был отключен. Данные двигатели были выбраны не случайно, так как расстояние в свету между машинами составляет всего около 5 см (рис. 4.46), что увеличивает вероятность обнаружения гармоник ВМП от соседних двигателей. При этом, двигатель сетевого насоса №6 управляется с помощью преобразователя частоты, поэтому частота основной гармоники сети для данного агрегата составляет 46,8 Гц.

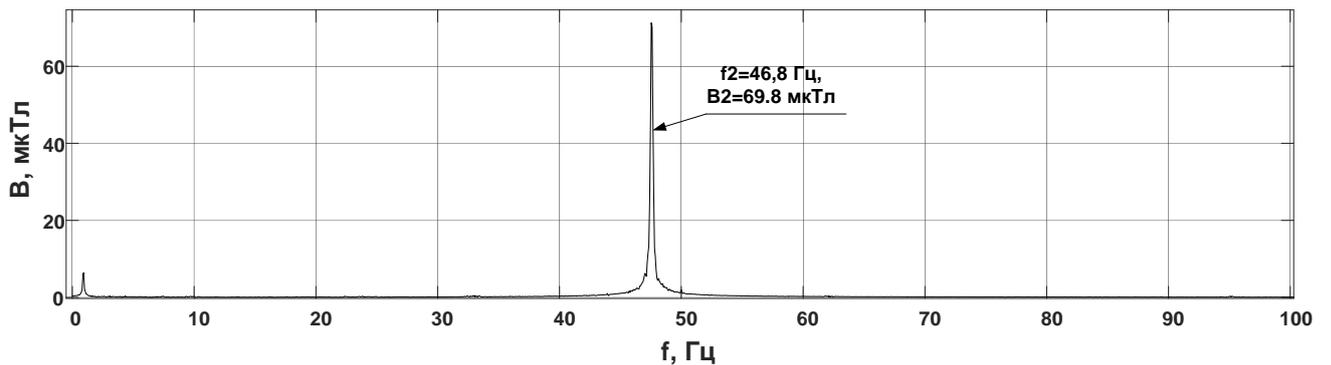


Рис. 4.46. Взаимное расположение АД сетевых насосов котельной

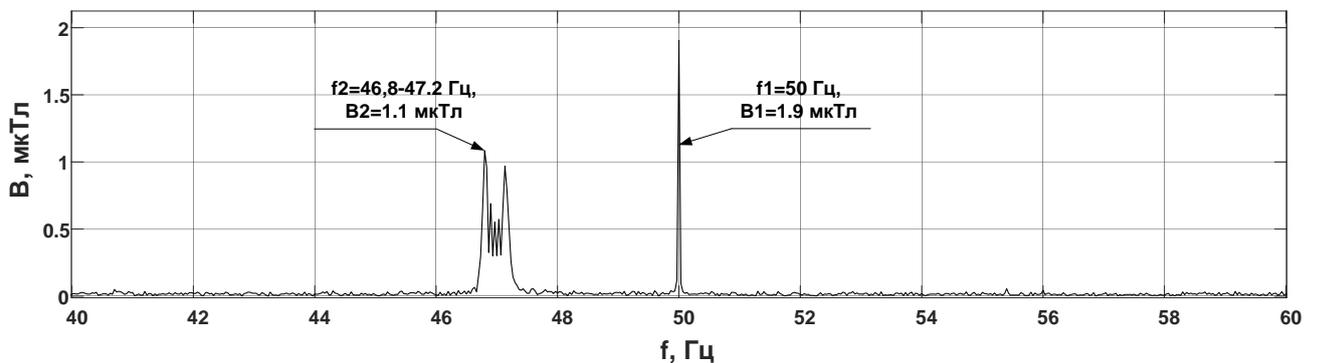
При измерении ВМП на корпусе АД сетевого насоса №5, ДХ был равноудален от АД сетевых насосов №4 и №6. Сигнал, полученный с ДХ, установленного на корпусе АД сетевого насоса №5, представляет собой сумму магнитных полей от АД сетевых насосов №4 и №6. Спектры сигналов, зарегистрированных на корпусах АД сетевых насосов №4–№6 представлены на рис. 4.47.



а)



б)



в)

Рис. 4.47. Амплитудные спектры сигналов с ДХ:

а – на корпусе АД сетевого насоса №4; б – на корпусе АД сетевого насоса №6;

в – на корпусе АД сетевого насоса №5 котельной в отключённом состоянии

Из рис. 4.47, в видно, что в спектре присутствуют гармонические составляющие с частотами 50 Гц (соответствующая основной гармонике сети АД сетевого насоса №4) и 46,8–47,2 Гц (соответствующие основной гармонике сети АД сетевого насоса №6 с преобразователем частоты) с амплитудами 1,1 и 1,9 мкТл соответственно. В то же время амплитуды сигналов на указанных выше частотах на корпусах двигателей, находящихся в работе, составляют около 90 мкТл для АД сетевого насоса №4 и 69,8 мкТл для АД сетевого насоса №6. Таким образом, амплитуды гармоник ВМП на исследуемом неработающем двигателе, обусловленные магнитными полями соседних АД, оказались приблизительно в 50 раз меньше амплитуд гармоник собственного ВМП АД, если бы он находился в работе.

Также нужно отметить, что в спектре сигнала, полученного с АД сетевого насоса №5, удалось обнаружить только гармоники, соответствующие основным гармоникам питающей сети АД сетевых насосов №4 и №6. Другие гармоники, в частности ГЭР, на фоне шума определить было невозможно.

Проведённые эксперименты позволяют сделать вывод о том, что магнитное поле соседних АД не может оказать существенного влияния на исследуемый сигнал радиальной составляющей индукции ВМП. Единственным исключением, как видно из рис. 4.47, могут служить двигатели, управляемые с помощью преобразователей частоты, так как в этом случае частота основной гармонической составляющей таких двигателей может совпадать с частотой одной из гармоник, характерной для повреждения узла машины. Это в свою очередь, может привести к неправильной оценке состояния узла АД. Правда, следует отметить, что вероятность появления данного события крайне низкая.

## Выводы по главе 4

1. На основе измерений ВМП, проведенных на АД 0,4 кВ котельной ИГЭУ и на АД 0,4 и 6 кВ ИвТЭЦ-2 показано, что ВМП АД четко выделяется на фоне шума и может быть зарегистрировано в условиях реальной эксплуатации. Особенно наглядно это показывают измерения на АД в пусковом режиме.

2. На основе исследований, проведенных на экспериментально-лабораторном стенде, а также на АД 0,4 кВ и 6кВ ИвТЭЦ-2, проведен анализ практической эффективности алгоритма АВЗС в задаче определения скольжения, который показал преимущество разработанного метода.

3. Подтверждена возможность определения качества регистрируемого сигнала с помощью критерия достоверности определения скольжения по ГЭР первого порядка.

4. Проведенные экспериментальные исследования доказали, что в ВМП АД присутствуют гармоники ФОР, которые при обрывах стержней обмотки ротора значительно увеличивают свои амплитуды, что может служить диагностическим признаком наличия неисправности.

5. Доказано, что для определения состояния ОР наиболее целесообразно использовать гармоники фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах ( $ФОР\nu$ -), а в качестве диагностического параметра – среднюю мощность сигнала, состоящего из этих гармоник.

6. Результаты экспериментов показали, что математические модели, основанные на методе конечных элементов, позволяют получить корректные результаты при моделировании ВМП АД с оборванным стержнем ОР и могут быть использованы на практике для определения пороговых значений диагностического параметра обрыва стержней ОР.

7. Разработана методика функциональной диагностики ОР АД СЭСН на основе спектрального анализа ВМП.

8. Разработан программно-аппаратный комплекс для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД СЭСН на основе спектрального анализа радиальной составляющей внешнего магнитного поля.

9. Проведенные экспериментальные исследования по оценке влияния ВМП близкорасположенных АД на возможные результаты диагностирования показали, что влиянием соседних АД можно пренебречь.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что проблема обрыва стержней короткозамкнутой ОР характерна для АД, работающих с тяжелыми условиями пуска, и наиболее актуальна для пылеугольных блоков электрических станций. Показано, что перспективным направлением разработки методов диагностирования ОР АД, представляющим научный и практический интерес, являются исследования в области изучения изменения радиальной составляющей ВМП.

2. Исследования, выполненные с помощью математических моделей, основанных на методе конечных элементов, и разработанного экспериментально-лабораторного стенда, выявили наличие влияния обрыва стержней ОР и эксплуатационных факторов (несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, статический и динамический эксцентриситет ротора) на спектр радиальной составляющей ВМП АД.

3. Доказано, что в радиальной составляющей ВМП АД содержатся гармоники с частотой, зависящей от скольжения, которые могут быть использованы для диагностирования ОР.

4. Выявлен и обоснован диагностический параметр обрыва стержней ОР АД – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной ОР на нижних боковых частотах. Данный параметр не подвержен влиянию несимметрии питающего напряжения и эксцентриситета ротора, что позволяет повысить достоверность диагностирования и использовать его в условиях реальной эксплуатации на работающих АД.

5. Проведенные экспериментальные исследования показали, что математические модели, основанные на методе конечных элементов, позволяют получить достоверные результаты при моделировании радиальной составляющей ВМП АД с оборванным стержнем ОР и могут быть использованы на практике для определения пороговых значений диагностического параметра обрыва стержней ОР.

6. Разработан скалярный анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала, который дает возможность с высокой точностью и при небольшом времени записи сигнала определять скольжение, а также амплитуды и частоты гармоник, генерируемых АД.

7. Разработана методика функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП, позволяющая повысить надежность эксплуатации АД собственных нужд электростанций за счет своевременного выявления обрыва стержней.

8. Разработан программно-аппаратный комплекс для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП, позволяющий автоматизировать процедуру диагностирования и повысить контролепригодность АД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савельев, В.А.** Проблемы пути повышения надежности электротехнического оборудования / В.А. Савельев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иваново: Иван, энерг. ун-т. – 1992. – С. 140–172.
2. **Назарычев, А.Н.** Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А.Н. Назарычев. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. – 168 с.
3. **Ермолин, Н.П.**, Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
4. **Рассказчиков, А.В.** Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – ЛПИ, 1982. – 195 с.
5. **Скоробогатов, А.А.** Разработка методов контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Иваново, 2006. – 155 с.
6. **Ковязин, Л.В.** Разработка принципов и устройств высокочастотного контроля электротехнического оборудования электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Иваново, 1993. – 280 с.
7. **Клоков, Б.К.** Ремонт обмоток электрических машин высокого напряжения: Учебное пособие / Б.К. Клоков, Р.Б. Уманцев. - М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.
8. **Кузнецов, Н.Л.** Надежность электрических машин: Учебное пособие / Н.Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
9. **Андреева, О.А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2009. – 159 с.

10. **O'Donnell, P.** IEEE Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part I, II & III. / P. O'Donnell // IEEE Transactions on Industry Applications, 1985. – vol. IA-21. – № 4. – P. 853–872.
11. **Tavner, P.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Tavner et al. – The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 543 p.
12. **Глазырина, Т.А.** Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Томск, 2012. – 120 с.
13. **Андреева, О.А.** Энергопотребление асинхронного двигателя при обрыве стержней и эксцентриситете короткозамкнутого ротора / О.А. Андреева, А.Н. Новожилов, А.П. Кислов // Вестник ПГУ. – 2004. – № 1. – С. 204–217.
14. **Антонов, М.В.** Эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебное пособие / М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец. – М.: Высшая школа, 1989. – 192 с.
15. **Маршак, Е.Л.** Ремонт и модернизация асинхронных двигателей / Е.Л. Маршак. – М.: Энергия, 1976. – 264 с.
16. **Иноземцев, Е.К.** Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (часть 1) / Е.К. Иноземцев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.
17. **Иноземцев, Е.К.** Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (часть 2) / Е.К. Иноземцев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 100 с.
18. **Иноземцев, Е.К.** Ремонт асинхронных электродвигателей электростанций / Е.К. Иноземцев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 120 с.
19. **Иноземцев, Е.К.** Ремонт мощных электродвигателей блочных электростанций / Е.К. Иноземцев. – М.: Энергия, 1975. – 104 с.
20. **Иноземцев, Е.К.** Ремонт мощных электродвигателей / Е.К. Иноземцев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
21. **Соколов, А.Г.** Об одной особенности эксплуатации мощных асинхронных двигателей / А.Г. Соколов, А.А. Скоробогатов // Состояние и

перспективы развития электротехнологии. XI Бенардосовские чтения: тез. докл. Международной науч.-техн. конф. Т. 2. – Иваново: ИГЭУ, 2003. – С. 145.

22. **Кужеков, С.Л.** Электродвигатели напряжением выше 1 кВ. Защитно-диагностические устройства / С.Л. Кужеков // Новости ЭлектроТехники. – 2011. – № 2 (72). – С. 60–65.

23. **Тонких, В.Г.** Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: дисс. ... канд. техн. наук: спец.05.20.02 / В.Г. Тонких. – Барнаул, 2009. – 166 с.

24. **Хомутов, С.О.** Прогнозирование состояний электродвигателей на основе анализа спектра напряженности внешнего магнитного поля / В.В.Бобров, С.О. Хомутов // Ползуновский альманах. – 2011. – № 2. – С. 114–118.

25. **Хомутов, С. О.** Внешнее магнитное поле асинхронного двигателя как отголосок поля в зазоре / В. В. Бобров, И. Ю. Братухин, В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: Материалы Международной научно-практической конференции / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд. – Новосибирск, 2009. – С. 289–292.

26. **А.С. 917136 (СССР).** Устройство для обнаружения повреждений стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. / Рассказчиков А.В., Савельев В.А., Чижов А.А., Жилиев В.Т. – Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки, 1982. – № 12.

27. **Скоробогатов, А. А.** Математическая модель магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни / А.А. Скоробогатов // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ; вып. 7. – М.: Энергоатомиздат, 2004 – С. 302–310.

28. **Скоробогатов, А.А.** Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора стержни / А.А. Скоробогатов // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 2. – С. 75–78.

29. **Пашали, Д.Ю.** Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю / Д. Ю. Пашали, И. Х. Хайруллин // Вестник УГАТУ. – 2006. – Т. 7. – № 1(14). – С. 165–170.

30. **А.С. 1610443**, МКИ G01 R 31/02. Устройство для контроля целостности стержней короткозамкнутой обмотки ротора электродвигателя. / Ковязин Л.В., Савельев В.А., Опубл. 30.11.90, Бюл. 44.
31. **А.С. 1262425**. СССР МИК СТ01R 31/02. Устройство для обнаружения повреждения стержней короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя / Рассказчиков А.В., Савельев В.А., Колобов А.Б., Сауцкий А.И. – опубл. 07.10.1986, бюл. №37.
32. **Брюханов, Г.А.** Метод и устройство диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей / Г.А. Брюханов, С.А. Князев // Электрические станции, 1984. – №2. – с. 44–45.
33. **А.С. 800906** (СССР). Способ определения повреждения стержней беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей / Брюханов Г.А., Князев С.А.. – опубл. 30.01.81, бюл. №4.
34. Rotor fault and location detector for induction motors: pat. USA US4808932 A G01R 31/02, 1989.
35. **Albrecht, P.F** Assessment of the reliability of motors in utility applications – updated. / P.F. Albrecht, J.C. Appiarius, D.K. Sharma // IEEE Transactions on Energy Conversion, 1986. – 39–46.
36. **Kliman, G.B.** Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors / G.B Kliman and others // IEEE Transaction on Energy Conversion, 1988. – Vol. 3. – Issue 4. – pp. 873–879.
37. **Гармаш, В.С.** Метод контроля исправности стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя / В.С. Гармаш // Изв. вузов. Энергетика, 1990. – № 10. – с. 50–52.
38. **А. С. 1304176** СССР. Способ контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя и устройство для его осуществления / В.Ф. Сивокобыленко, В.С. Гармаш, 1988. – № 17.
39. **Prashant, S.S.** Computer Aided Online Fault Diagnosis of Induction Motors / S.S. Prashant and others // Electrical power quality and utilization. – 2007. – pp. 41–47.

40. **Thomson, W.T.** Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories / W. T. Thomson, R. J. Gilmore // Proceedings of 32nd Turbomachinery Symposium, Texas, A&M University, USA, September, 2003. – pp. 145–156.
41. **Miletic, A.** Frequency Converter Influence on Induction Motor Rotor Faults Detection Using Motor Current Signature Analysis – Experimental Research / A. Miletic // Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta, 2003. – pp. 54–59.
42. **Thomson, W. T.** On-Line Motor Current Signature Analysis Prevents Premature Failure of Large Induction Motor Drives / W.T. Thomson // maintenance & asset management. – 2009. – № 3. – pp. 30–35.
43. **Thomson, W. T.** Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults // W. T. Thomson, M. Fenger / IEEE Industry Applications Magazine. – 2001. – № 4. – pp. 26–34.
44. **Elkasabgy, N.M.** Detection of broken bar in the cage rotor on an induction machine / N.M. Elkasabgy, A. R. Eastman, G. E. Dawson // IEEE Transactions on Industry Application. – 1992. – №. 1. – pp. 165–171.
45. **Kliman, G. B.** Methods of motor current signature analysis / G. B. Kliman et al // Elect. Mach. Power Syst. – 1992. – №. 5. – pp. 463–474.
46. **Wang, J.** Broken-Rotor-Bar Diagnosis for Induction Motors / J. Wang, et al // 9th International Conference on Damage Assessment of Structures, 2011. – pp. 1–10.
47. **Петухов, В.С.** Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости Электротехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.
48. **Panadero, R.P.** Review Diagnosis Methods of Induction Electrical Machines based on Steady State Current / R.P. Panadero and others // 11th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering, 2009. – pp. 91–95.
49. **Faiz, J.** Criterion Function for Broken-Bar Fault Diagnosis in Induction Motor under Load Variation Using Wavelet Transform / J. Faiz and others // Electromagnetics. – 2009. – vol. 29. – pp. 220–234.

50. **Nandi, S.** Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines- A Review / S. Nandi, H.A. Toliyat // Proceedings of the IEEE-IAS, 1999. – pp. 197–204.
51. **Douglas, H.** A New Algorithm for Transient Motor Current Signature Analysis Using Wavelets / H. Douglas // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 40. – № 5. – pp. 1361–1368.
52. **Mehala, N.** Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis / N. Mehala, R. Dahiya // International Journal of Systems Applications, Engineering & Development. – 2007. – № 1. – pp. 29–35.
53. **Mohamed, H.A.F.** Diagnosis and Fault Tolerant Control of the Induction Motors Techniques a Review / H.A.F. Mohamed, K.S. Gaeid // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2010. – № 2. – pp. 227–246.
54. **Antoniño, J. A.** Study of the startup transient for the diagnosis of broken bars in induction motors: A review / J. A. Antoniño, M. Riera, J. Roger-Folch, V. Climente // 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering, 2005. – pp. 123–128.
55. **Benbouzid, M. E.** A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection / M. E. Benbouzid // IEEE Trans. Ind. Electron, 2000. – vol. 47. – pp. 984–993.
56. **Новоселов, Е.М.** Диагностика обрывов стержней обмотки ротора электродвигателя на основе анализа тока статора / Е.М. Новоселов, А.А. Скоробогатов, А.Н. Назарычев // Дефектоскопия. – 2011. – № 3. – 74 – 82.
57. **Novoselov, E.M.** Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Electric Motors Based on Stator Current Analysis / A.N. Nazarychev, A.A. Skorobagatov, E.M. Novoselov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, №. 3. – pp. 209–215.
58. **Verucchi, C. J.** A review on fault diagnosis of induction machines / C. J. Verucchi, G. G. Acosta, F. A. Benger // Latin American applied research. – 2008. – № 2. – pp. 113–121.

59. **Benbouzid, M.E.** Monitoring and Diagnosis of Induction Motors Electrical Faults Using a Current Park's Vector Pattern Learning Approach / M.E. Benbouzid, H. Nejjari // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2000. – № 3. – pp. 730–735.
60. **Петухов, В.С.** Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В.С. Петухов // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 1(49). – С. 50–52.
61. **Петухов, В.С.** Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В.С. Петухов // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 2 (50). – С. 42–48.
62. **Вейнреб, К.** Диагностика ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / К. Вейнреб // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 4. – С. 133-154.
63. **Вейнреб, К.** Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / К. Вейнреб // Электричество. – 2012. – № 7. – С. 51-57.
64. **Вейнреб, К.** Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.09.01 / К. Вейнреб. – Москва, 2012. – 44 с.
65. **Kokko, Voitto** Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements: Academic dissertation / University of Oulu / public discussion in Raahensali, on March 14th, 2003. – Oulu, Finland, 2003. – 155 p.
66. **А.С. №1273850** (СССР). Способ обнаружения дефектов короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя / А.В. Барков, М.П. Цыпкин [и др.]. Опубл 30.11.86, Бюл. №44.
67. **Русов, В.А.** Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов. – Пермь: вып. №1, 1996. – 176 с.
68. **Gagdon, B.C.** Faltering pulse can reveal ailing motor. / B.C.Gagdon, D.J. Hopgood // Elect. Rev. (Gr. Brit.) – 1975. – vol. 14. – pp. 37–38.

69. **ГОСТ 183-74 (2001)**. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. – Введ. 1981-01-01. – М., Изд-во стандартов, 1976. – 43 с.
70. **Tavner, P.** Condition Monitoring of Electrical Machines / P. Tavner, J. Penman // Research studies press LTD, 1987. – 302 p.
71. **Negrea, M.D.** Electromagnetic Flux Monitoring for Detecting Faults in Electrical Machines: dissertation ... doctor of technology / M.D. Negrea – Helsinki University of Technology, Finland, 2006. – 140 p.
72. **Henoa, H.** A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor / H. Henoa, C. Demian, G.A. Capolino // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2003. – vol. 39. – pp. 1511–1516.
73. **Chernyavska, I.** Analysis of Broken Rotor Bar Fault in a Squirrel-Cage Induction Motor by Means of Stator Current and Stray Flux Measurement / I. Chernyavska, V. Ondrej // International Power Electronics and Motion Control Conference, 2016. – pp. 532–537.
74. **Romary, R.** Induction machine fault diagnosis using an external radial flux sensor / R. Romary, R. Corton, D. Thailly, J. F. Brudny // EPJ. Appl. Phys. – 2005. – vol. 32. – №. 2. – pp. 125–132.
75. **Romary, R.** Eccentricity and broken rotor bars faults – Effects on the external axial field / R. Romary, A. Ceban, R. Pusca // in Proc. ICEM Conf., Roma, Italy, Sep. 6–8, 2010. – pp. 1–6.
76. **Seungdeog, C.** Performance-Oriented Electric Motors Diagnostics in Modern Energy Conversion Systems / C. Seungdeog, B. Akin, M.M. Rahimian, H.A. Toliyat // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2012. – vol. 59. – №. 2. – pp. 1266–1277.
77. **Fireteanu, V.** Early detection of a squirrel-cage bar breakage through harmonics of stator currents and of magnetic field in the motor proximity, / V. Fireteanu, A.I. Constantin // 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2017. – pp. 392–397.
78. **Fireteanu, V.** Effects of rotor faults on operation parameter and the low frequency harmonics of the magnetic field outside induction motors / V. Fireteanu, P. Taras, R. Romary, R. Pusca, A. Ceban // Proc. of XV th ISEF Symposium, 2011.

79. **Negrea, M.** Electromagnetic flux-based condition monitoring for electrical machines / M. Negrea, P. Jover, A. Arkkio // 2005 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Vienna, 2005. – pp. 1–6.
80. **Fireteanu, V.** Finite element analysis and experimental study of the near-magnetic field for detection of rotor faults in induction motors / V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca, A. Ceban // Progress In Electromagnetics Research. – 2013. – Vol. 50. – pp. 37–59.
81. **Fireteanu, V.** Finite element analysis of electromagnetic and mechanical effects of rotor faults in induction motors/ V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca, // Proceedings of the International Conference on ELECTRONICS, COMPUTERS and ARTIFICIAL INTELLIGENCE - ECAI-2013, Pitesti, 2013. – pp. 1–9.
82. **Romary, R.** Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis / R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecointe and J. F. Brudny, // 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Paris, 2013. – pp. 247–256.
83. **Romary, R.** Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis / A. Ceban, R. Pusca, R. Romary // IEEE Transactions on Industrial Electronics, May 2012. – vol. 59. – №. 5. – pp. 2082 –2093.
84. **Геллер, Б.** Высшие гармоники в асинхронных машинах / Б. Геллер, В. Гамата. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
85. **Chen, Z.** Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations / Z. Chen, Pu Shi, Y. Vagapov // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 69. – № 14. – pp. 36–43.
86. **Pezzani, C.** Detecting Broken Rotor Bars With Zero-Setting Protection / C. Pezzani, P. Doñolo, G. Bossio, M. Doñolo et al // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50. – Issue 2. – pp. 1373–1384.
87. **Kalaskar, C. S.** Gond Motor Current Signature Analysis to Detect the Fault in Induction Motor / C. S. Kalaskar, S. Chaitali, J. Vitthal // Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4. – Issue 6. – pp. 58–61.
88. **Liu, D.** Off-the-grid compressive sensing for broken-rotor-bar fault detection in squirrel-cage induction motors [электр. ресурс] / D. Liu, D. Lu // IFAC-

PapersOnLine. – 2015. – Vol. – 48. – Issue 21. – pp. 1451–1456. – Режим доступа: <http://www.merl.com/publications/docs/TR2015-096.pdf>, (дата обращения 13.02.2018).

89. **Скоробогатов, А.А.** Математическая модель магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни / А.А. Скоробогатов // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ; вып. 7, – М.: Энергоатомиздат, 2004. – С. 302–310.

90. **Савельев, В.А.** Анализ токораспределения и магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни / В.А. Савельев, А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов // Вестник УГТУ. – 2004. – № 12. – С. 353–357.

91. **Сергиенко, А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

92. **Павлович, С.Н.** Ремонт и обслуживание электрооборудования: учеб. пособие / С.Н. Павлович, Б.И. Фираго. – Минск: Выш.шк., 2009. – 245 с.

93. Объем и нормы испытаний электрооборудования СО 34.45-51.300-97 РД 34.45-51.300-97. – Введ. 08.09.1997. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2014. – 256 с.

94. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.

95. **Назарычев, А. Н.** Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя / А.Н. Назарычев [и др.] // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ; вып. 9, – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 260–266.

96. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928с.

97. **Никольский, В. В.** Теория электромагнитного поля / В.В. Никольский. – М.: Высш. шк., 1964. – 384 с.

98. **Бессонов, Л. А.** Теоритические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 8-е изд. – М., Высш. шк., 1986. – 263 с.

99. **Жумангулов, К.К.** Внешние магнитные поля электромеханических преобразователей электротехнических комплексов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.09.03 / НАО «Алматинский институт энергетики и связи». – Алматы, 2006. – 41 с.

100. **Сотников, В.В.** Развитие теории внешнего магнитного поля асинхронных двигателей, способов его снижения и измерения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: специальность 05.09.01 / Марийский государственный технический университет. – Йошкар-Ола, 2002. – 38 с.

101. **Казаков, Ю.Б.** Экспериментальная оценка энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей / Ю.Б. Казаков [и др] // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 4. – С. 37–43.

102. **Казаков, Ю.Б.** Численный анализ внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсно-модулированным напряжением / Ю.Б. Казаков [и др] // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 34–37.

103. **Казаков, Ю.Б.** Анализ способов и методов снижения внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсно-модулированным напряжением / Ю.Б. Казаков, Е.А. Шумилов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 3. – С. 40–42.

104. **Шумилов, Е.А.** Анализ способов и методов снижения внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсно модулированным напряжением: автореф. дис. ... канд. технических наук : 05.09.01 / Е.А. Шумилов. – Самара, 2013. – 18 с.

105. **Пашали, Д.Ю.** Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01 / Пашали Д.Ю. – Уфа, 2004 – 41 с.

106. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

107. ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Часть 24. Онлайнное обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.

108. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. – М.: Стандартинформ, 2010. – 42 с.

109. **Сильвестер, П.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. – М.: Мир, 1986. – 229 с.

110. Condition of the rotor winding (CRW): свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2012612805 / **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов. – заявка № 2012611402, заявл. 28.02.2012, зарег. 23.04.2012.

111. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя: пат. 2441249 Рос. федерация: МПК G01R31/34 / **Е.М. Новоселов** [и др.]. – № 2010126816/28, заявл. 30.06.2010, опубл. 27.01.2012, бюл. № 3.

112. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя по току статора: пат. № 2559162 Рос. федерация: МПК G01R 31/34 / **Е.М. Новоселов** [и др.] – № 2014109236/28, заявл. 11.03.2014, опубл. 10.08.2015, бюл. № 22.

113. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2624986 Рос. федерация: МПК G01R 31/34. / **Е.М. Новоселов** [и др.] – № 2016128118, заявл. 11.07.2016, опубл. 11.07.2017, бюл. № 20.

114. Slip Finder: свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2013613657 / **Е.М. Новоселов** [и др.]. – заявка № 2013611381, заявл. 18.02.2013, зарег. 11.04.2013.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Данные для моделирования электродвигателей

В данном приложении представлены данные, необходимые для создания конечноэлементных математических моделей АД в программном комплексе Ansys Maxwell с помощью инструмента RМхprt.

#### П.1.1. Данные для моделирования двигателей типа АИР71А6

Таблица П.1.1. Общие параметры АД типа АИР71А6

Раздел  Machine (Общие параметры)			
Machine Type	Тип электрической машины	Three-Phase Induction Motor	
Number of Poles	Количество полюсов	6	
Stray Loss Factor	Коэффициент добавочных потерь	0,01	
Frictional Loss	Потери на трение в подшипниках	8	Вт
Windage Loss	Вентиляционные потери	8	Вт
Reference Speed	Синхронная частота вращения	1000	Об/мин

Таблица П.1.2. Параметры статора АД типа АИР71А6

Раздел  Stator (Статор)			
Outer Diameter	Внешний диаметр	116	мм
Inner Diameter	Внутренний диаметр	77,8	мм
Length	Длина статора	65	мм
Stacking Factor	Коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью	0,95	
Steel Type	Тип стали	Сталь 2214	

Продолжение таблицы П.1.2

Number of Slots	Число пазов на статоре	36	
Slot type	Форма паза статора	3	
Lamination Sectors	Количество секторов	0	
Press Board Thickness	Толщина нажимного листа	0	мм
Skew Width	Скос пазов. Измеряется в числе пазов	0	

Таблица П.1.3. Параметры паза статора АД типа АИР71А6

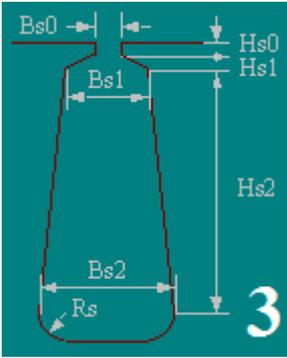
Раздел  Slot (Паз статора)			
Auto Design	Автоматический расчёт конфигурации паза	нет	false
Parallel Tooth	Параллельные стенки у зубца паза	нет	false
Hs0		0,6	мм
Hs1		0,6	мм
Hs2		10,9	мм
Bs0		2	мм
Bs1		4	мм
Bs2		5,3	мм
Rs		0	мм

Таблица П.1.4. Параметры обмотки статора АД типа АИР71А6

Раздел  Winding (Обмотка статора) (вкладка Winding)			
Winding Layers	Количество слоёв обмотки в пазу	1	
Winding Type	Тип обмотки	Whole Coiled	
Parallel Branches	Количество параллельных ветвей	1	
Conductor per Slot	Количество проводников в пазу	110	
Coil Pitch	Шаг обмотки (только для двухслойных)	-	
Number of Strands	Число жил в одном проводнике	1	
Wire Wrap	Изоляция провода	0,04	мм
Wire Size	Диаметр провода	0,45	мм

Продолжение таблицы П.1.4

Раздел  Winding (Обмотка статора) (вкладка End/Insulation)			
Input Half-turn Length	Ввод длины полувитка	145	мм
End Extension	Односторонняя длина прямолинейного участка вылета лобовых	0	мм
Base Inner Radius	Базовый внутренний радиус	0	мм
Tip Inner Diameter	Внутренний диаметр изгиба лобовых частей обмотки	0	мм
End Clearance	Зазор между двумя соседними вылетами лобовых	0	мм
Slot Liner	Толщина пазовой изоляции	0	мм
Wedge Thickness	Толщина пазового клина	0	мм
Layer Insulation	Толщина прокладки между слоями обмотки	0	мм
Limited Fill Factor	Коэффициент заполнения паза	0,75	

Таблица П.1.5. Параметры ротора АД типа АИР71А6

Раздел Rotor (Ротор)			
Stacking Factor	Коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью	0,95	
Number of Slots	Число пазов на роторе	33	
Slot Type	Форма пазов ротора	1	
Outer Diameter	Внешний диаметр ротора	77,4	мм
Inner Diameter	Внутренний диаметр ротора	25	мм
Length	Длина магнитопровода ротора	65	мм
Steel Type	Материал листов магнитопровода ротора	Сталь 2214	
Skew Width	Скос пазов. Измеряется в числе пазов	1,5	
Cast Rotor	Литой ротор	да	true
Half Slot	Половина паза	нет	false
Double Cape	Двойная «белчья клетка»	нет	false

Таблица П.1.6. Параметры паза ротора АД типа АИР71А6

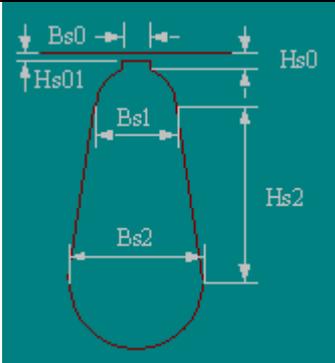
Раздел  Slot (Размеры паза ротора)				
Hs0		0,2	мм	
Hs01		0	мм	
Hs2		11,2	мм	
Bs0		0,8	мм	
Bs1		3,5	мм	
Bs2		1,7	мм	

Таблица П.1.7. Параметры обмотки ротора АД типа АИР71А6

Раздел  Winding (Обмотка ротора)			
Bar Conductor Type	Материал стержней КЗ обмотки	алюминий	
End Length	Расстояние между пакетом ротора и КЗ кольцом	0	мм
End Ring Width	Толщина КЗ кольца	4	мм
End Ring Height	Высота КЗ кольца	10	мм
End Ring Conductor Type	Материал короткозамыкающего кольца	алюминий	

Таблица П.1.8. Параметры вала ротора АД типа АИР71А6

Shaft			
Magnetic Shaft	Изготовлен ли вал из магнитного материала	да	

Таблица П.1.9. Параметры вала ротора АД типа АИР71А6

Casing	
Материал корпуса	алюминий
Толщина корпуса	5 мм

Таблица П.1.10. Рабочие параметры АД типа АИР71А6

<b>Вкладка General</b>			
Load Type	Тип нагрузки: Const Speed – постоянная скорость Const Power – постоянная мощность Const Torque – постоянный момент Linear Torque – линейный момент Load Fan – вентиляторная нагрузка	Const Power	
Rated Output Power	Номинальная выходная мощность (мощность на валу)	370	Вт
Rated Voltage	Номинальное линейное напряжение	380	В
Rated Speed	Номинальная частота вращения	900	Об/мин
Operating Temperature	Рабочая температура двигателя	75	градусов
<b>Вкладка Three-Phase Induction Motor</b>			
Frequency	Частота питающего напряжения	50	Гц
Winding Connection	Соединение обмоток: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wye - звезда</li> <li>• Delta - треугольник</li> </ul>	Wye	

## П.1.2. Данные для моделирования двигателей типа ЗВР71-2

Таблица П.1.11. Общие параметры АД типа ЗВР71-2

Раздел  Machine (Общие параметры)			
Machine Type	Тип электрической машины	Three-Phase Induction Motor	
Number of Poles	Количество полюсов	2	
Stray Loss Factor	Коэффициент добавочных потерь	0,018	
Frictional Loss	Потери на трение в подшипниках	7	Вт
Windage Loss	Вентиляционные потери	5	Вт
Reference Speed	Синхронная частота вращения	2880	Об/мин

Таблица П.1.12. Параметры статора АД типа ЗВР71-2

Раздел  Stator (Статор)			
Outer Diameter	Внешний диаметр	100	мм
Inner Diameter	Внутренний диаметр	54.1	мм
Length	Длина статора	66	мм
Stacking Factor	Коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью	0,95	
Steel Type	Тип стали	Сталь 1211	
Number of Slots	Число пазов на статоре	24	
Slot type	Форма паза статора	2	
Lamination Sectors	Количество секторов	0	
Press Board Thickness	Толщина нажимного листа	0	мм
Skew Width	Скос пазов. Измеряется в числе пазов	0	

Таблица П.1.13. Параметры паза статора АД типа 3BP71-2

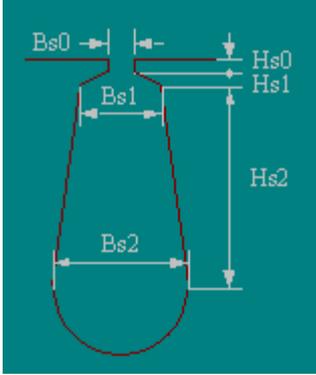
Раздел  Slot (Паз статора)			
Auto Design	Автоматический расчёт конфигурации паза	нет	false
Parallel Tooth	Параллельные стенки у зубца паза	нет	false
Hs0		0,2	мм
Hs1		1	мм
Hs2		5	мм
Bs0		2	мм
Bs1		4,5	мм
Bs2		6	мм
Rs		0	мм

Таблица П.1.14. Параметры обмотки статора АД типа 3BP71-2

Раздел  Winding (Обмотка статора) (вкладка Winding)			
Winding Layers	Количество слоёв обмотки в пазу	1	
Winding Type	Тип обмотки: Whole Coiled (концентрическая “вразвалку”) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Half-Coiled (шаблонная)</li> <li>• Editor (ручной режим раскладки обмотки)</li> </ul>	Whole Coiled	
Parallel Branches	Количество параллельных ветвей	1	
Conductor per Slot	Количество проводников в пазу	119	
Coil Pitch	Шаг обмотки (только для двухслойных)	-	
Number of Strands	Число жил в одном проводнике (элементарных проводников)	1	
Wire Wrap	Изоляция провода	0	мм
Wire Size	Диаметр провода	0,45	мм

Продолжение таблицы П.1.14

Раздел  Winding (Обмотка статора) (вкладка End/Insulation)			
Input Half-turn Length	Ввод длины полувитка	auto	
End Extension	Односторонняя длина прямолинейного участка вылета лобовых	0	мм
Base Inner Radius	Базовый внутренний радиус	0	мм
Tip Inner Diameter	Внутренний диаметр изгиба лобовых частей обмотки	0	мм
End Clearance	Зазор между двумя соседними вылетами лобовых	0	мм
Slot Liner	Толщина пазовой изоляции	0	мм
Wedge Thickness	Толщина пазового клина	0	мм
Layer Insulation	Толщина прокладки между слоями обмотки	0	мм
Limited Fill Factor	Коэффициент заполнения паза	0,75	

Таблица П.1.15. Параметры ротора АД типа 3BP71-2

Раздел Rotor (Ротор)			
Stacking Factor	Коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью	0,95	
Number of Slots	Число пазов на роторе	19	
Slot Type	Форма пазов ротора	1	
Outer Diameter	Внешний диаметр ротора	53,6	мм
Inner Diameter	Внутренний диаметр ротора	18	мм
Length	Длина магнитопровода ротора	66	мм
Steel Type	Материал листов магнитопровода ротора	Сталь 1211	
Skew Width	Скос пазов. Измеряется в числе пазов	1	
Cast Rotor	Литой ротор	да	true
Half Slot	Половина паза	нет	false
Double Cape	Двойная «белчья клетка»	нет	false

Таблица П.1.16. Параметры паза ротора АД типа ЗВР71-2

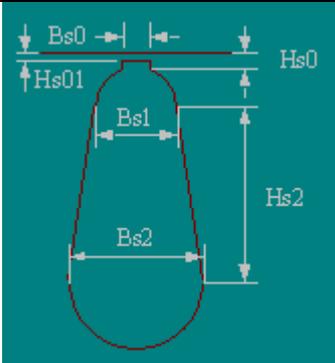
Раздел  Slot (Размеры паза ротора)				
Hs0		0,1	мм	
Hs01		0	мм	
Hs2		5,5	мм	
Bs0		1	мм	
Bs1		3,5	мм	
Bs2		1,7	мм	

Таблица П.1.17. Параметры обмотки ротора АД типа ЗВР71-2

Раздел  Winding (Обмотка ротора)			
Bar Conductor Type	Материал стержней КЗ обмотки	алюминий	
End Length	Расстояние между пакетом ротора и КЗ кольцом	0	мм
End Ring Width	Толщина КЗ кольца	8	мм
End Ring Height	Высота КЗ кольца	9	мм
End Ring Conductor Type	Материал короткозамыкающего кольца	алюминий	

Таблица П.1.18. Параметры вала ротора АД типа ЗВР71-2

Shaft			
Magnetic Shaft	Изготовлен ли вал из магнитного материала	да	

Таблица П.1.19. Параметры вала ротора АД типа ЗВР71-2

Casing	
Материал корпуса	силумин
Толщина корпуса	5 мм

Таблица П.1.20. Рабочие параметры АД типа ЗВР71-2

<b>Вкладка General</b>			
Load Type	Тип нагрузки: Const Speed – постоянная скорость Const Power – постоянная мощность Const Torque – постоянный момент Linear Torque – линейный момент Load Fan – вентиляторная нагрузка	Const Power	
Rated Output Power	Номинальная выходная мощность (мощность на валу)	250	Вт
Rated Voltage	Номинальное линейное напряжение	380	В
Rated Speed	Номинальная частота вращения	2880	Об/мин
Operating Temperature	Рабочая температура двигателя	75	градусов
<b>Вкладка Three-Phase Induction Motor</b>			
Frequency	Частота питающего напряжения	50	Гц
Winding Connection	Соединение обмоток: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wye - звезда</li> <li>• Delta - треугольник</li> </ul>	Wye	

### П.1.3. Данные для моделирования двигателей типа ДАМСО 1512-8

Таблица П.1.21. Общие параметры АД типа ДАМСО 1512-8

Раздел  Machine (Общие параметры)			
Machine Type	Тип электрической машины	Three-Phase Induction Motor	
Number of Poles	Количество полюсов	8	
Stray Loss Factor	Коэффициент добавочных потерь		
Frictional Loss	Потери на трение в подшипниках	1	Вт
Windage Loss	Вентиляционные потери	2,4	Вт
Reference Speed	Синхронная частота вращения	750	Об/мин

Таблица П.1.22. Параметры статора АД типа ДАМСО 1512-8

Раздел  Stator (Статор)			
Outer Diameter	Внешний диаметр	980	мм
Inner Diameter	Внутренний диаметр	728	мм
Length	Длина статора	600	мм
Stacking Factor	Коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью	0,95	
Steel Type	Тип стали	1211	
Number of Slots	Число пазов на статоре	72	
Slot type	Форма паза статора	6	
Lamination Sectors	Количество секторов	0	
Press Board Thickness	Толщина нажимного листа	0	мм
Skew Width	Скос пазов. Измеряется в числе пазов	0	

Таблица П.1.23. Параметры паза статора АД типа ДАМСО 1512-8

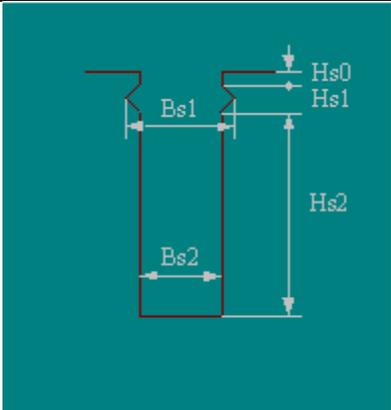
Раздел  Slot (Паз статора)			
Auto Design	Автоматический расчёт конфигурации паза	нет	false
Parallel Tooth	Параллельные стенки у зубца паза	нет	false
Hs0		1	мм
Hs1		0	мм
Hs2		58	мм
Bs1		20	мм
Bs2		20	мм

Таблица П.1.24. Параметры обмотки статора АД типа ДАМСО 1512-8

Раздел  Winding (Обмотка статора) (вкладка Winding)			
Winding Layers	Количество слоёв обмотки в пазу	2	
Winding Type	Тип обмотки: Whole Coiled (концентрическая “вразвалку”) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Half-Coiled (шаблонная)</li> <li>• Editor (ручной режим раскладки обмотки)</li> </ul>		
Parallel Branches	Количество параллельных ветвей	1	
Conductor per Slot	Количество проводников в пазу	36	
Coil Pitch	Шаг обмотки (только для двухслойных)	9	
Number of Strands	Число жил в одном проводнике (элементарных проводников)	0	
Wire Wrap	Изоляция провода	0,3	мм
Wire Size	Диаметр провода	4,6x2,3	мм

Продолжение таблицы П.1.24

Раздел  Winding (Обмотка статора) (вкладка End/Insulation)			
Input Half-turn Length	Ввод длины полувитка	auto	
End Extension	Односторонняя длина прямолинейного участка вылета лобовых	0	мм
Base Inner Radius	Базовый внутренний радиус	0	мм
Tip Inner Diameter	Внутренний диаметр изгиба лобовых частей обмотки	0	мм
End Clearance	Зазор между двумя соседними вылетами лобовых	0	мм
Slot Liner	Толщина пазовой изоляции	0	мм
Wedge Thickness	Толщина пазового клина	0	мм
Layer Insulation	Толщина прокладки между слоями обмотки	0	мм
Limited Fill Factor	Коэффициент заполнения паза	0,75	

Таблица П.1.25. Параметры ротора АД типа ДАМСО 1512-8

Раздел Rotor (Ротор)			
Stacking Factor	Коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью	0,95	
Number of Slots	Число пазов на роторе	84	
Slot Type	Форма пазов ротора	1	
Outer Diameter	Внешний диаметр ротора	747,8	мм
Inner Diameter	Внутренний диаметр ротора	200	мм
Length	Длина магнитопровода ротора	600	мм
Steel Type	Материал листов магнитопровода ротора	1211	
Skew Width	Скос пазов. Измеряется в числе пазов	0	
Cast Rotor	Литой ротор	нет	true
Half Slot	Половина паза	нет	false
Double Cape	Двойная «беличья клетка»	да	false
		1	

Таблица П.1.26. Параметры пазов ротора АД типа ДАМСО 1512-8

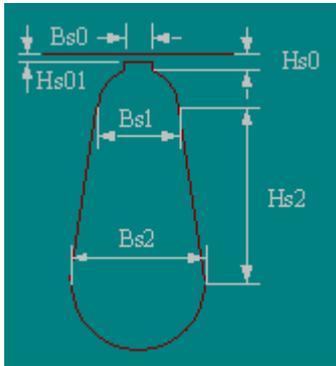
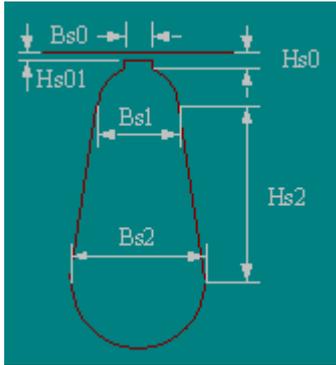
Раздел  Slot (Размеры паза ротора)			
Hs0		0,5	мм
Hs01		0	мм
Hs2		0	мм
Bs0		2	мм
Bs1		15	мм
Bs2		15	мм
Раздел  Bottom Slot (Размеры паза ротора)			
Hs0		7	мм
Hs2		0	
Bs0		3	мм
Bs1		15	мм
Bs2		15	мм

Таблица П.1.27. Параметры верхней обмотки ротора АД типа ДАМСО 1512-8

Раздел  Winding (Верхняя обмотка ротора)			
Bar Conductor Type	Материал стержней КЗ обмотки	Латунь	
End Length	Расстояние между пакетом ротора и КЗ кольцом	80	мм
End Ring Width	Толщина КЗ кольца	15	мм
End Ring Height	Высота КЗ кольца	30	мм
End Ring Conductor Type	Материал короткозамыкающего кольца	Латунь	

Таблица П.1.28. Параметры нижней обмотки ротора АД типа ДАМСО 1512-8

Раздел  Winding (Нижняя обмотка ротора)			
Bar Conductor Type	Материал стержней КЗ обмотки	Медь	
End Length	Расстояние между пакетом ротора и КЗ кольцом	30	мм
End Ring Width	Толщина КЗ кольца	15	мм
End Ring Height	Высота КЗ кольца	30	мм
End Ring Conductor Type	Материал короткозамыкающего кольца	Медь	

Таблица П.1.29. Параметры вала ротора АД типа ДАМСО 1512-8

Shaft		
Magnetic Shaft	Изготовлен ли вал из магнитного материала	да

Таблица П.1.30. Параметры вала ротора АД типа ДАМСО 1512-8

Casing	
Материал корпуса	чугун
Толщина корпуса	40 мм

Таблица П.1.31. Рабочие параметры АД типа ДАМСО 1512-8

Вкладка General			
Load Type	Тип нагрузки: Const Speed – постоянная скорость Const Power – постоянная мощность Const Torque – постоянный момент Linear Torque – линейный момент Load Fan – вентиляторная нагрузка	Const Power	
Rated Output Power	Номинальная выходная мощность	57000	Вт
Rated Voltage	Номинальное линейное напряжение	6000	В
Rated Speed	Номинальная частота вращения	740	Об/мин
Operating Temperature	Рабочая температура двигателя	75	градусов
Вкладка Three-Phase Induction Motor			
Frequency	Частота питающего напряжения	50	Гц
Winding Connection	Соединение обмоток	Wye	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Рабочие параметры тестовых асинхронных двигателей

В табл. П.2.1 представлены номинальные параметры тестовых АД.

Таблица П.2.1. Номинальные параметры тестовых АД

Параметр	АД №1	АД №2
Тип двигателя	ЗВР71-2	АИР71А6
Число пар полюсов	1	3
Номинальная мощность, Вт	250	370
Напряжение, В	380	380
Номинальный ток, А	0,56	1,4
Номинальная частота вращения, об/мин	2880	900
КПД, %	–	0,65
Коэффициент мощности, о.е.	0,83	0,63

В табл. П.2.2 представлены значения рабочих параметров АД типа ЗВР71-2 при различной нагрузке на валу ротора, полученные на экспериментальном стенде.

Таблица П.2.2. Измеренные рабочие параметры АД типа ЗВР71-2 при различной нагрузке на валу ротора

Нагрузка	%	10	50	100	150
Ток в фазе А	А	0,35	0,41	0,53	0,64
Ток в фазе Б	А	0,35	0,43	0,52	0,65
Ток в фазе С	А	0,35	0,41	0,53	0,64
Напряжение в фазе А	В	220	220	220	220
Напряжение в фазе Б	В	220	220	220	220
Напряжение в фазе С	В	220	220	220	220
Активная мощность в фазе А	Вт	22	58	88	124
Активная мощность в фазе Б	Вт	24	60	92	128
Активная мощность в фазе С	Вт	22	56	88	126
Частота вращения	Об/мин	2984	2938	2897	2848

В табл. П.2.3–П.2.5 представлены значения рабочих параметров трех однотипных АД типа АИР71А6 при различной нагрузке на валу ротора, полученные на экспериментальном стенде. Двигатели обозначены как АИР №1, АИР №2, АИР №3.

Таблица П.2.3. Измеренные рабочие параметры двигателя АИР №1 при различной нагрузке на валу ротора

Нагрузка	%	15	30	50	80	120
Ток в фазе А	А	1,36	1,35	1,325	1,34	1,425
Ток в фазе Б	А	1,36	1,35	1,325	1,34	1,425
Ток в фазе С	А	1,36	1,35	1,325	1,34	1,425
Напряжение в фазе А	В	224	224	224	224	224
Напряжение в фазе Б	В	224	224	224	224	224
Напряжение в фазе С	В	224	224	224	224	224
Активная мощность в фазе А	Вт	100	115	140	175	210
Активная мощность в фазе Б	Вт	100	115	140	175	210
Активная мощность в фазе С	Вт	100	115	140	175	210
Коэффициент мощности	о.е.	0,28	0,345	0,409	0,497	0,6
Частота вращения	Об/мин	990	981	970	955	935

Таблица П.2.4. Измеренные рабочие параметры двигателя АИР №2 при различной нагрузке на валу ротора

Нагрузка	%	15	30	50	80	120
Ток в фазе А	А	1,34	1,31	1,3	1,32	1,38
Ток в фазе Б	А	1,35	1,32	1,32	1,33	1,29
Ток в фазе С	А	1,33	1,31	1,3	1,32	1,38
Напряжение в фазе А	В	230	230	230	230	230
Напряжение в фазе Б	В	230	230	230	230	229
Напряжение в фазе С	В	229	229	229	229	229
Активная мощность в фазе А	Вт	87	106,8	128	158	198
Активная мощность в фазе Б	Вт	84	105	127	157	197
Активная мощность в фазе С	Вт	84	104	125	156	195
Коэффициент мощности	о.е.	0,277	0,35	0,421	0,517	0,62
Частота вращения	Об/мин	989,4	982,3	973,6	962,2	945,6

Таблица П.2.5. Измеренные рабочие параметры двигателя АИР №3 при различной нагрузке на валу ротора

<b>Нагрузка</b>	<b>%</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	<b>120</b>
<b>Ток в фазе А</b>	А	1,39	1,37	1,35	1,36	1,41
<b>Ток в фазе Б</b>	А	1,4	1,38	1,36	1,37	1,42
<b>Ток в фазе С</b>	А	1,38	1,36	1,34	1,35	1,4
<b>Напряжение в фазе А</b>	В	230	230	230	230	230
<b>Напряжение в фазе Б</b>	В	230	230	230	230	230
<b>Напряжение в фазе С</b>	В	230	230	230	230	229
<b>Активная мощность в фазе А</b>	Вт	91	111	132	162	201
<b>Активная мощность в фазе Б</b>	Вт	85,6	107	127	157	197
<b>Активная мощность в фазе С</b>	Вт	86	107	127	157	196
<b>Коэффициент мощности</b>	о.е.	0,273	0,344	0,415	0,51	0,612
<b>Частота вращения</b>	Об/мин	989,6	981	972,6	960	942

Представленные в табл. П.2.2 данные измерений АД типа ЗВР71-2, полученные при нагрузке близкой к номинальной, соответствуют номинальным параметрам АД, представленные в табл. Б.1.

Представленные в табл. П.2.3–П.2.5 данные измерений АД типа АИР71А6, полученные при нагрузке 80 и 120 %, близки к значениям номинальных параметров АД, представленных в табл. П.2.1. Единственный параметр, значение которого существенно отличается от номинального – это частота вращения ротора. Номинальное значение этого параметра 900 Об/мин, а по результатам измерений, проведенных на трех однотипных АД, было получено минимальное значение 935 Об/мин на АИР №1 при нагрузке 120 % от номинальной.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Проверка корректности моделирования магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя

На рис. П.3.1, П.3.2 показано сравнение форм сигналов с датчика ВИД АД №1 и №2, соответственно, полученных на математической модели (рис. П.3.1, *а, в* и рис. П.3.2, *а, в*) и на экспериментальном стенде (рис. П.3.1, *б, г* и рис. П.3.2, *б, г*).

Формы сигналов с датчика ВИД АД №1 (рис. П.3.1), полученные на математической модели схожи с реальными сигналами, однако отличаются гораздо более выраженной "зубчатостью", обусловленной зубцовыми гармониками ротора. Обрыв одного стержня ОР АД №1 привел к появлению в сигналах, представленных на рис. П.3.1, *в, г* явно выраженных пиков, чередующихся с частотой скольжения, причем на реальном сигнале (рис. П.3.1, *г*) этот пик проявляется более четко.

Формы реальных и виртуальных сигналов с датчика ВИД АД №2 (рис. П.3.2) практически идентичны друг другу. Обрыв одного стержня ОР (рис. П.3.2, *в, г*) не приводит к явным изменениям сигнала.

Далее, с помощью анализатора спектра, был произведен спектральный анализ полученных сигналов и определены значения амплитуд гармоник на частотах соответствующих гармоникам ФОР, результаты представлены в табл. П.3.1, П.3.2, при этом  $U_{иор}$  – амплитуды гармоник для ИОР, а  $U_{пор}$  – амплитуды гармоник для ПОР.

На рис. П.3.3, П.3.4 показаны амплитудные спектры сигналов, представленных на рис. П.3.1 и П.3.2 соответственно.

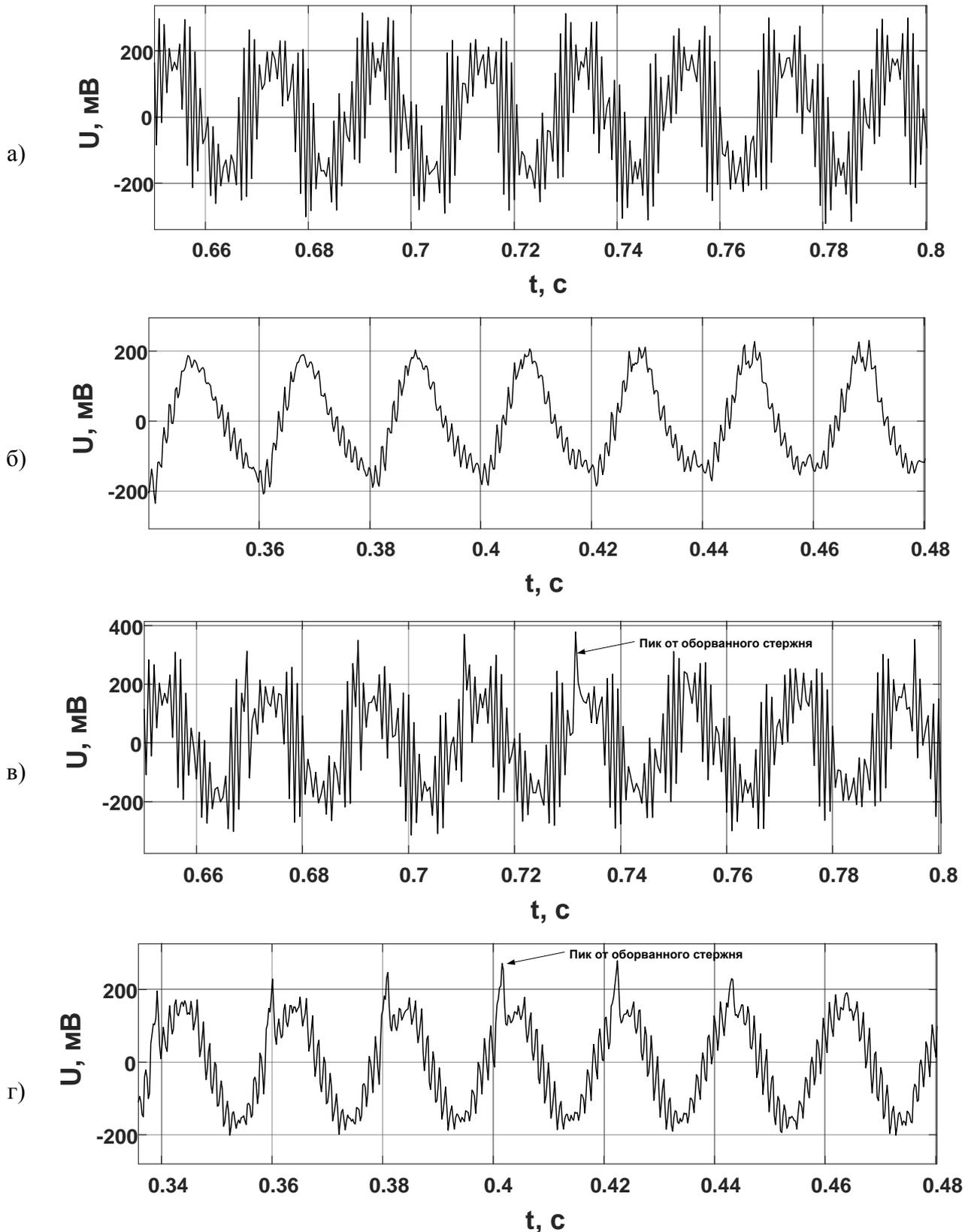


Рис. П.3.1. Форма сигнала с датчика ВИД АД №1 при номинальной нагрузке:  
а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

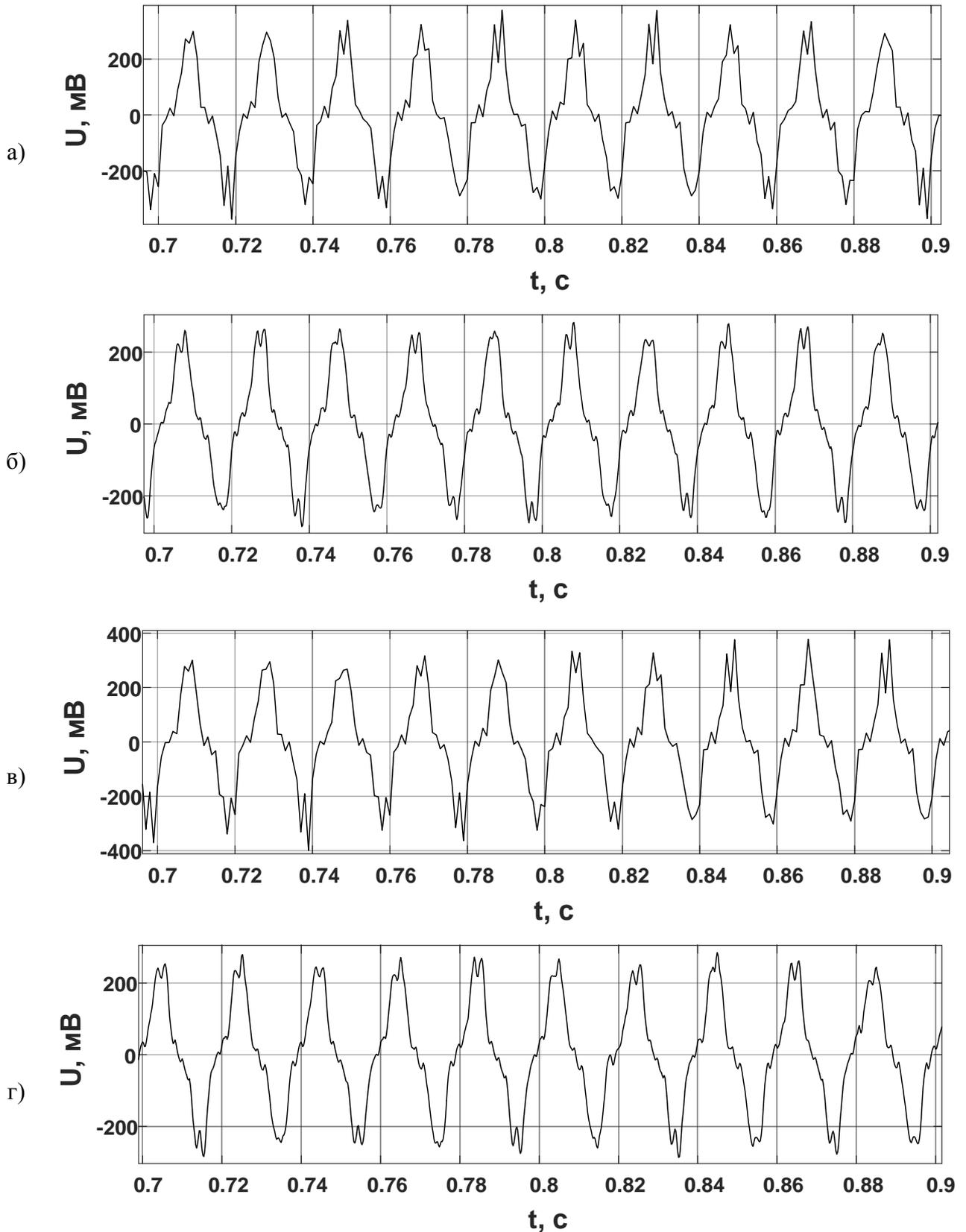


Рис. П.3.2. Форма сигнала с датчика ВИД АД №2 при нагрузке 80% от номинальной:  
 а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

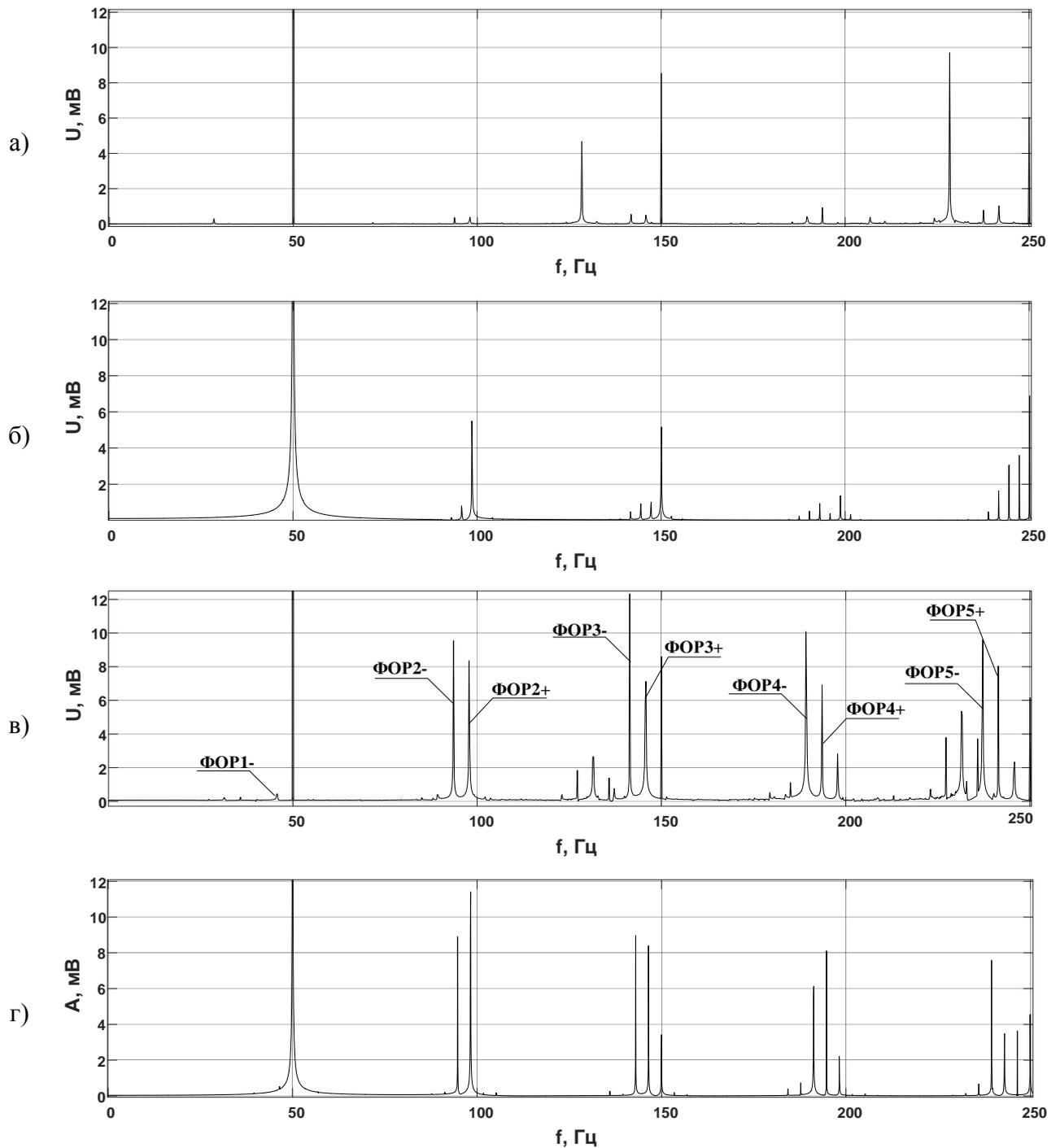


Рис. П.3.3. Спектры сигналов с датчика ВИД АД №1 при номинальной нагрузке:  
 а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

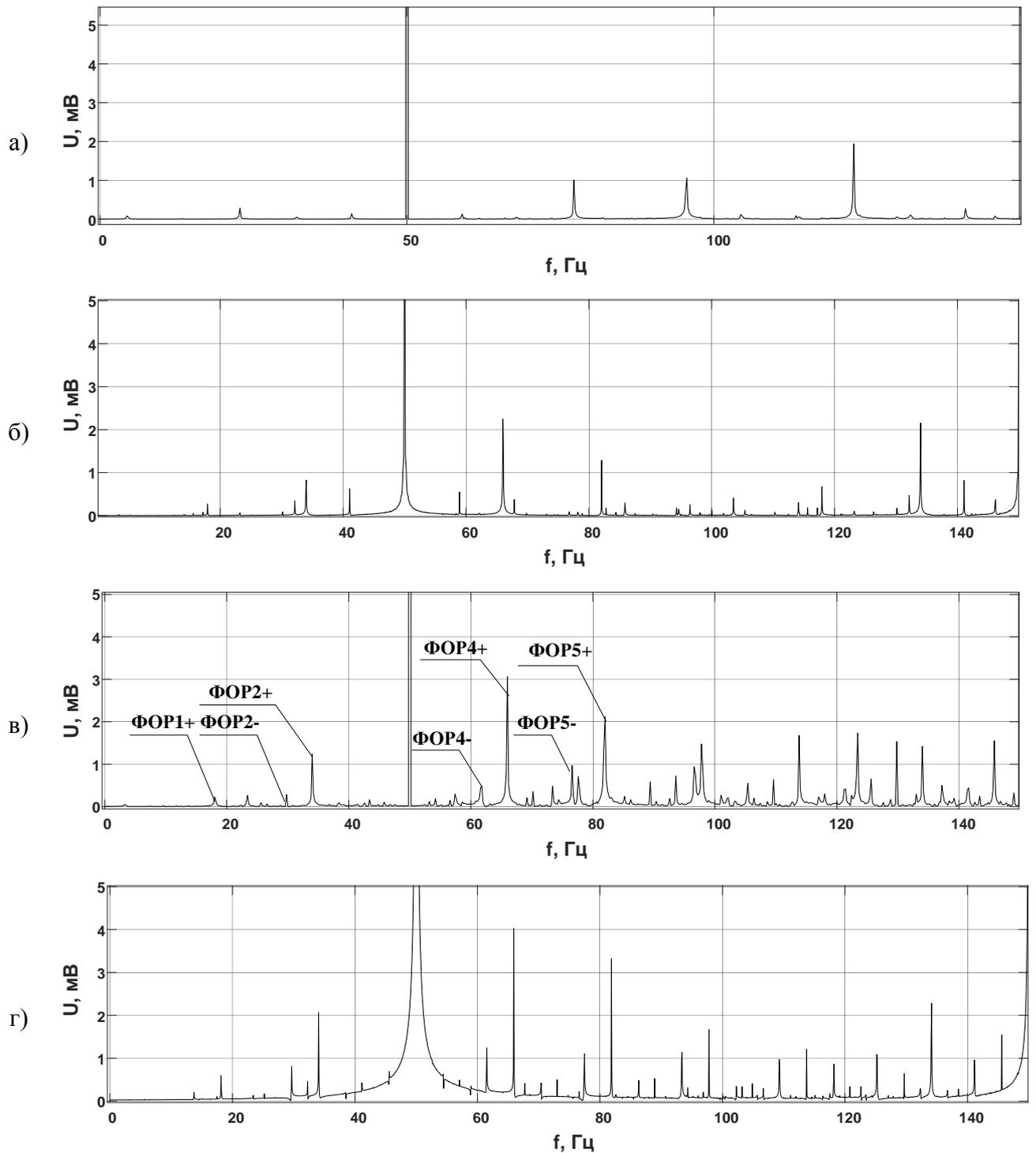


Рис. П.3.4. Спектры сигналов с датчика ВИД АД №2 при нагрузке 80% от номинальной:  
а – исправная обмотка ротора (математическая модель); б – исправная обмотка ротора (стенд); в – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (математическая модель); г – обмотка ротора с одним оборванным стержнем (стенд)

Из Рис. П.3.3, П.3.4 и табл. П.3.1, П.3.2 видно, что обрыв стержня обмотки ротора действительно существенно влияет на магнитное поле воздушного зазора АД, что выражается в существенном увеличении амплитуд определенных гармонических составляющих сигнала. Наибольший рост продемонстрировали гармоники, частоты которых совпадают с частотами гармоник ФОР, определяемых выражением (1.1), при этом относительное увеличение амплитуд может составлять 10 и более раз.

Таблица П.3.1. Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu$ -, полученные с датчика ВИД АД №1

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	1+/ $f_c$	2+	3+	4+	5+
Частота, Гц	Гц	45,7	93,5	141,4	189,2	237,1	50	97,8	145,7	193,5	241,4
<b>Математическая модель АД №1</b>											
U <sub>иор</sub>	мВ	0,09	0,46	0,61	0,59	0,79	161,55	0,44	0,68	0,95	1,13
U <sub>пор</sub>	мВ	0,45	10,00	12,10	10,30	9,80	161,38	9,36	10,02	7,25	8,10
U <sub>пор</sub> /U <sub>иор</sub>	о.е.	5,00	21,74	19,84	17,46	12,41	1,00	21,27	14,74	7,63	7,17
<b>Физическая модель АД №1</b>											
U <sub>иор</sub>	мВ	0,23	1,11	1,21	1,02	1,63	168,8	5,4	1,36	0,41	3,08
U <sub>пор</sub>	мВ	0,41	9,3	9,3	9,6	8,15	169,11	11,41	9,2	8,21	5,7
U <sub>пор</sub> /U <sub>иор</sub>	о.е.	1,78	8,38	7,69	9,41	5,00	1,00	2,11	6,76	20,02	1,85

Таблица П.3.2. Амплитуды гармоник  $\Phi OP$ , полученные с датчика ВИД АД №2

Порядок гармоники ФОР		1-	2-	3-	4-	5-	1+	2+	3+/ $f_c$	4+	5+
Частота, Гц	Гц	13,4	28,0	44,5	59,6	77,1	18,9	34,0	50,0	65,9	81,9
<b>Математическая модель АД №2</b>											
U <sub>иор</sub>	мВ	0,04	0,15	0,03	0,10	1,56	0,18	0,17	223,20	0,14	0,55
U <sub>пор</sub>	мВ	0,18	0,89	1,13	0,95	1,28	0,48	1,88	223,20	3,34	2,83
U <sub>пор</sub> /U <sub>иор</sub>	о.е.	4,50	5,93	37,67	9,50	0,82	2,67	11,06	1,00	23,86	5,15
<b>Физическая модель АД №2</b>											
U <sub>иор</sub>		0,04	0,08	0,05	0,14	0,16	0,29	0,90	203,30	2,22	1,20
U <sub>пор</sub>		0,21	0,89	1,23	1,30	1,50	0,62	2,10	203,40	4,09	3,40
U <sub>пор</sub> /U <sub>иор</sub>		5,25	11,13	24,60	9,29	9,38	2,14	2,33	1,00	1,84	2,83

По данным табл. П.3.1, П.3.2 были построены графики (рис. П.3.5– П.3.8) отношений амплитуд гармоник ФОР реального и виртуального сигналов с датчика ВИД АД №1 и №2, на Рис. П.3.5, С.6 показаны графики при ИОР, а на Рис. П.3.7, П.3.8 –при одном оборванном стержне.

Из табл. П.3.1, П.3.2 и рис. П.3.5– П.3.8 видно, что амплитуды виртуальных сигналов, кроме амплитуды гармоники на частоте сети, полученные при ИОР, в два и более раза меньше соответствующих амплитуд реальных сигналов, причем наибольшую разницу демонстрируют гармоники  $\Phi OP\nu+$ . Объясняется это следующим. Реальный АД не является идеальным, например, в любом АД имеется эксцентриситет ротора, который, как было показано в главе 2, может значительно влиять на амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu+$ . Именно эксцентриситетом ротора обусловлено значительное расхождение амплитуд гармоник  $\Phi OP\nu+$  реального и виртуального сигналов.

Амплитуды гармоник  $\Phi OP\nu-$  реальных сигналов в среднем в 2 раза превышали амплитуды виртуальных сигналов, демонстрируя стабильное поведение. Это также подтверждает сделанный в главе 2 вывод о том, что для определения состояния ОР АД лучше использовать гармоники  $\Phi OP\nu-$ .

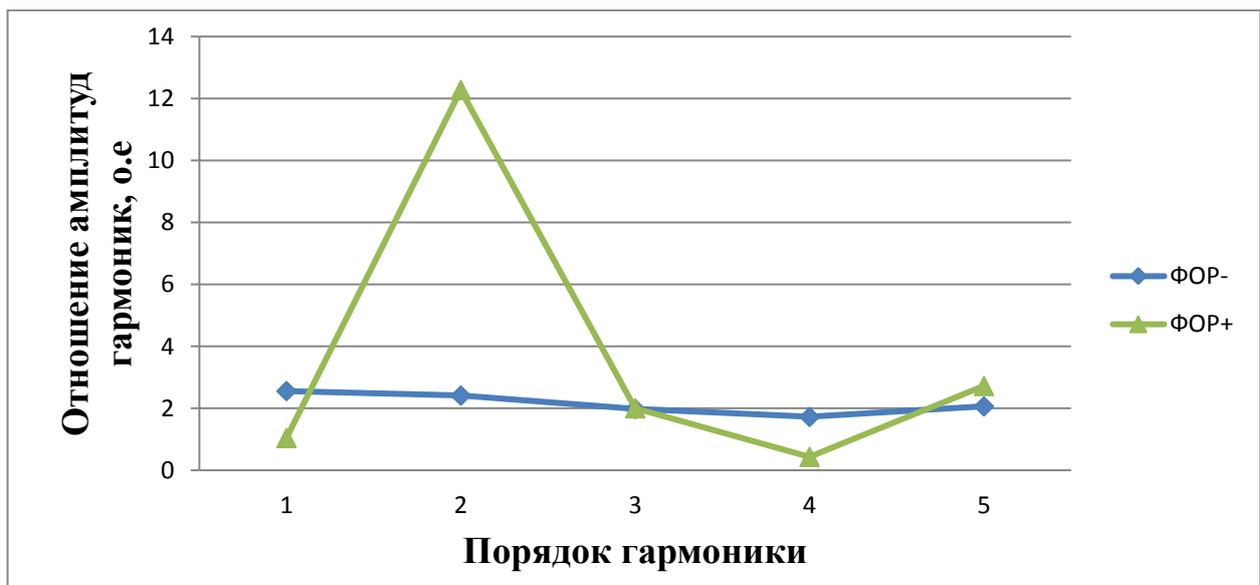


Рис. П.3.5. Отношения амплитуд гармоник ФОР реального и виртуального сигналов с датчика ВИД АД №1 при исправной обмотке ротора



Рис. П.3.6. Отношения амплитуд гармоник ФОР реального и виртуального сигналов с датчика ВИД АД №1 при одном оборванном стержне в обмотке ротора

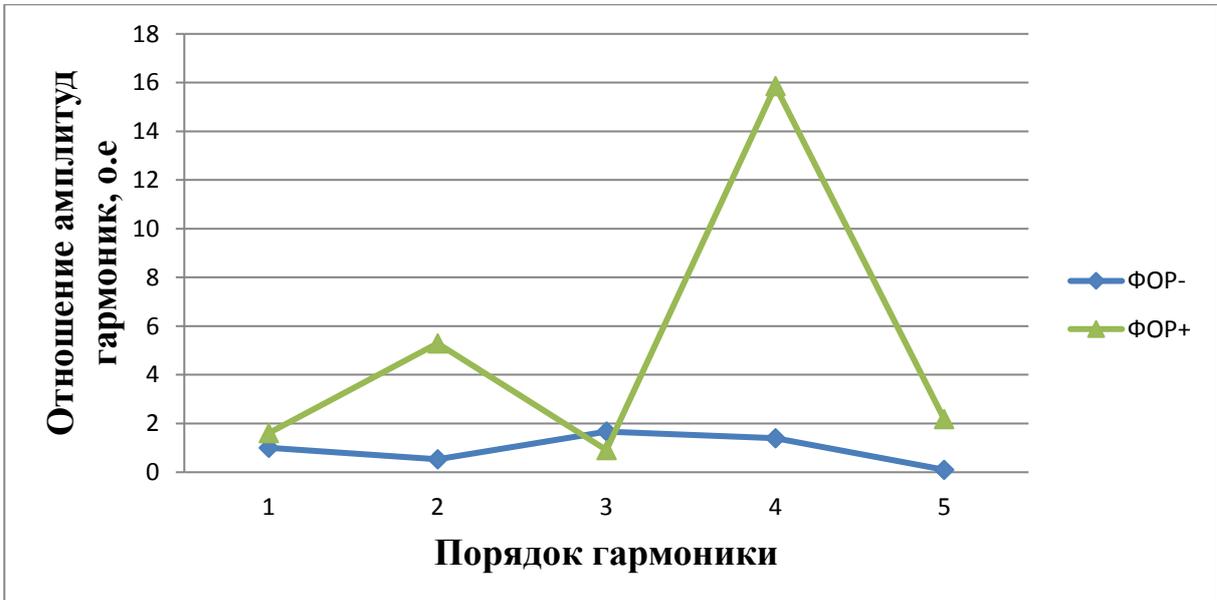


Рис. П.3.7. Отношения амплитуд гармоник ФОР реального и виртуального сигналов с датчика ВИД АД №2 при исправной обмотке ротора

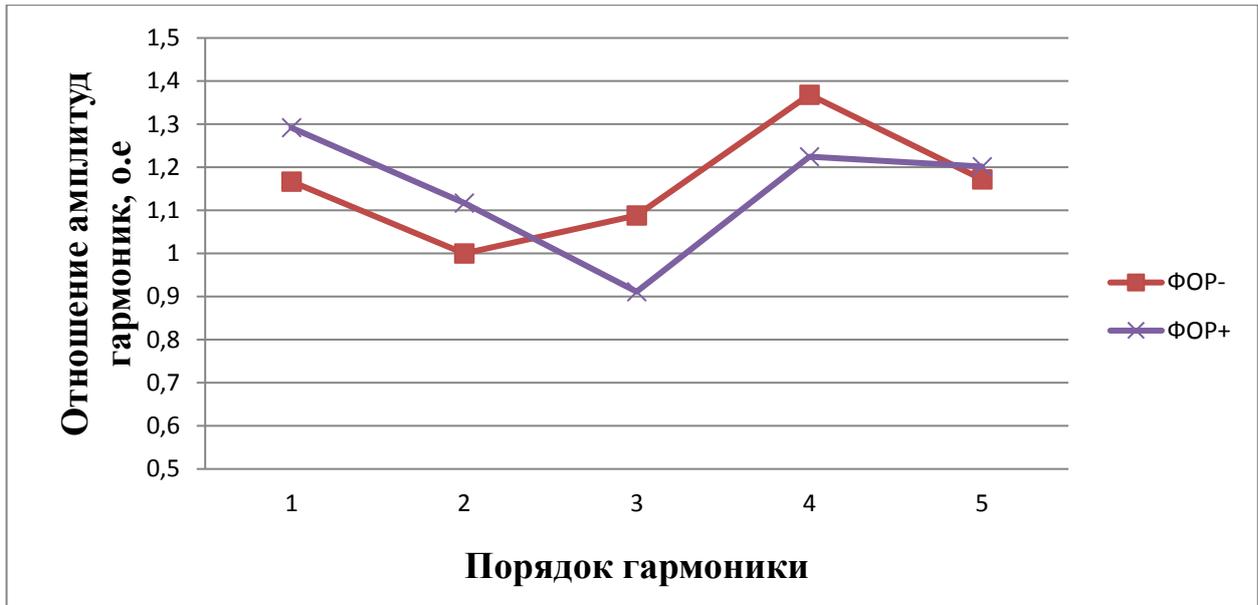


Рис. П.3.8. Отношения амплитуд гармоник ФОР реального и виртуальных сигналов с датчика ВИД АД №1 при одном оборванном стержне в обмотке ротора

При обрыве одного стержня ОР картина меняется, значения амплитуд гармоник ФОР виртуальных сигналов оказались близки к значениям амплитуд реальных сигналов. Полученная разница амплитуд реальных и виртуальных сигналов находится в пределах 30%, что является хорошим результатом.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что конечноэлементные модели, реализованные в Ansys Maxwell, позволяют получить корректные результаты моделирования магнитного поля воздушного зазора АД с оборванными стержнями в ОР.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2441249

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ РОТОРА  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010126816

Приоритет изобретения 30 июня 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 января 2012 г.

Срок действия патента истекает 30 июня 2030 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Б.И. Симонов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2559162

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ РОТОРА  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ТОКУ  
СТАТОРА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014109236

Приоритет изобретения **11 марта 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **10 июля 2015 г.**

Срок действия патента истекает **11 марта 2034 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Л.Л. Кирий*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2624986

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ РОТОРА  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Страхов Александр Станиславович (RU), Назарычев Александр Николаевич (RU), Новоселов Евгений Михайлович (RU), Литвинов Сергей Николаевич (RU), Скоробогатов Андрей Александрович (RU)*

Заявка № 2016128118

Приоритет изобретения 11 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 июля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

**Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение**

**«Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

**УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЁМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ**

<b>30.01.2017</b>	<b>005361</b>	<b>2017103085</b>
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

<b>ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ</b> <i>оригинал заявки</i>	<b>(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</b>	<b>ВХОДЯЩИЙ №</b>
30 ЯНВ 2017	(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу	
<input type="checkbox"/> <b>ФИПС 01117</b> <i>(информационный номер международной заявки в базе международной подачи, уведомлений по международной публикации)</i> <input type="checkbox"/> (87) <i>(номер и дата международной публикации международной заявки)</i> <input type="checkbox"/> (96) <i>(номер европейской заявки и дата ее подачи)</i> <input type="checkbox"/> (97) <i>(номер и дата публикации европейской заявки)</i>	<b>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ</b> <i>(полный адрес, включая и варианты или альтернативные адреса)</i> 153003, Российская Федерация, г. Иваново, ул. Рабфизовская, 34, ИГЭУ, патентно-инженерный отдел. Телефон: (4932)-26-97-33 Факс: (4932)-38-57-01 E-mail: truhina@rio.ips.ru <b>АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ</b> <i>(используется при подаче заявки на секретные изобретения)</i>	
<b>ЗАЯВЛЕНИЕ</b> о выдаче патента Российской Федерации на изобретение	В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация	
<b>(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ</b>		
СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБРЫВОВ СТЕРЖНЕЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТКОВ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ		
<b>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ</b> <i>(фирма, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица, место нахождения или место массовой регистрации юридического лица))</i>  федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленин" (ИГЭУ) 153003, Российская Федерация, г. Иваново, ул. Рабфизовская, 34, RU  <input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ <i>(исключить наименование)</i>  <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ Министерство образования и науки Российской Федерации  Контракт от №	<b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</b>  ОГРН 1033700074430 КПП 370201001 ИНН 3731000308  СНИЛС ДОКУМЕНТ <i>(серия, номер)</i>  КОД СТРАНЫ RU <i>(если не установлено)</i>	
<b>(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ</b> <i>(указывается фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, исполняющего обязанности своего представителя для подачи или получения патента от его имени в федеральной службе по интеллектуальной собственности или выполняющего посредническую функцию)</i>	<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону	

ОТД ВИТ  
01 ФЕВ 2017  
240 6015  
Реш

42/1

Общее количество документов в листах	42	Лицо, зарегистрировавшее документы  Юдина Е.В.
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	
Количество платежных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу «www.fips.ru» в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры»		

**Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение**

**«Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

**УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЁМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ**

<b>02.05.2017</b>	<b>026814</b>	<b>2017115451</b>
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

<b>ПОРЯДОК ПОСТУПЛЕНИЯ</b> <small>оригинал документа</small> <b>02 МАЙ 2017</b> <b>ФНВСОД17</b>	(2) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №	
<input type="checkbox"/> (86) <small>(регистрационный отбор международной заявки и даты международной заявки, установленные получателем информации)</small>	(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на интеллектуальную фазу	<b>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ</b> <small>(почтовый адрес, фактический и интеллектуальный адрес)</small> 153003, Российская Федерация, г. Иваново, ул. Рафаэловская, 34, ИГЭУ, Патентно-лицензионный отдел. Телефон: (4932)-26-97-33 Факс: (4932)-38-57-01 E-mail: <a href="mailto:publinfo@prio.fips.ru">publinfo@prio.fips.ru</a> <b>АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ</b> <small>(указывается при подаче заявки на секретное изобретение)</small>	
<input type="checkbox"/> (87) <small>(номер и дата международной публикации международной заявки)</small>	<b>З А Я В Л Е Н И Е</b> о выдаче патента Российской Федерации на изобретение		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация
<input type="checkbox"/> (96) <small>(номер международной заявки и дата ее подачи)</small>			
<input type="checkbox"/> (97) <small>(номер и дата публикации международной заявки)</small>			
<b>(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ</b> СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБРЫВОВ СТЕРЖНЕЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ИХ КОЛИЧЕСТВА			
<b>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ</b> (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полностью определенное наименование – через запятую или место нахождения, название страны и почтовый индекс)		<b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</b>	
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) 153003, Российская Федерация, г. Иваново, ул. Рафаэловская, 34, RU		ОГРН 1033700074430 КПП 370201001 ИНН 3731000308 СНИЛС ДОКУМЕНТ <small>(серия, номер)</small>	
<input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнителем работ <small>(укажите наименование)</small>		КОД СТРАНЫ RU <small>(если не определен)</small>	
<input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ Министерство образования и науки Российской Федерации			
Контракт от №		<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону	

ОТД #17  
04 МАЙ 2017  
1240 6015

*Ред*

415/1

Общее количество документов в листах	45	Лицо, зарегистрировавшее документы  Сергеева Н.Н.
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия <small>(для промышленного образца)</small>	0	
Количество платежных документов	1	

*Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу «www.fips.ru» в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры»*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012613805

Condition of the rotor winding (CRW)

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *Скоробогатов Андрей Александрович, Новоселов Евгений Михайлович (RU)*

Заявка № 2012611402

Дата поступления 28 февраля 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
23 апреля 2012 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013613657

Slip Finder

Правообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *Новоселов Евгений Михайлович (RU), Скоробогатов Андрей Александрович (RU), Литвинов Сергей Николаевич (RU)*

Заявка № 2013611381

Дата поступления 18 февраля 2013 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
11 апреля 2013 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина»  
(ИГЭУ)**

ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003  
тел.(4932) 32-72-43, факс (4932) 38-57-01  
e-mail: office@ispu.ru <http://игэу.рф> <http://ispu.ru>

№ \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2013 г.  
На № \_\_\_\_\_

**АКТ**

**о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы  
Новоселова Евгения Михайловича**

Данным актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Новоселова Е.М. внедрены в учебный процесс в Ивановском государственном энергетическом университете по дисциплине «Методы и технические средства диагностирования электрооборудования», а именно:

- лабораторный стенд «Методы оперативного контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя»;
- методические указания к лабораторной работе «Методы оперативного контроля состояния обмотки ротора асинхронного электродвигателя».

Проректор по учебной работе ИГЭУ



Гусенков А.В.



124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д.10, стр 3,  
 тел./факс: (499) 735-22-91, 735-54-41, 732-26-34, 732-73-95,  
 E-mail: radius@rza.ru, http://www.rza.ru  
 ИНН 7735100332, КПП 773501001

**АКТ**
**о внедрении результатов диссертационной работы  
 Новоселова Евгения Михайловича**

Данным актом подтверждается, что на ЗАО «РАДИУС Автоматика» в микропроцессорном устройстве защиты электродвигателей «Сириус-2-Д» были использованы результаты диссертационной работы Новоселова Е.М., а именно:

- алгоритм определения скольжения асинхронного электродвигателя;
- алгоритм определения состояния короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя.

Положительный эффект от внедрения выражается в расширении функциональных возможностей устройства.

Генеральный директор

19.04.2013



Ю.Н. Давыденко



МИНЭНЕРГО РОССИИ  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 дополнительного профессионального образования  
 "ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
 ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ" (ФГАОУ ДПО "ПЭИПК")  
 Авиационная ул., д. 23, Санкт-Петербург, 196135  
 тел. (812) 708-48-46, 373-61-74, факс 708-48-46; 371-83-53, e-mail: [rector@peipk.spb.ru](mailto:rector@peipk.spb.ru)

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе  
 ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», к.т.н., доцент



В.В. Старовойтенков

14 сентября 2016 г.

### АКТ

#### внедрения результатов диссертационной работы Новоселова Е.М. в учебный процесс Петербургского энергетического института повышения квалификации

В учебный процесс кафедры «Диагностика и управление техническим состоянием энергетического оборудования» (ДЭО) в ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Министерства энергетики Российской Федерации внедрены следующие результаты диссертационной работы Новоселова Е.М.:

- анализ повреждаемости электродвигателей системы собственных нужд электростанций;
- обзор существующих и новых диагностических признаков повреждения и методов диагностики короткозамкнутых обмоток ротора асинхронных электродвигателей;
- метод, алгоритм и программное обеспечение для функционального диагностирования обмотки ротора на основе спектрального анализа радиальной составляющей внешнего магнитного поля.

С использованием указанных результатов диссертации Новоселова Е.М. проводятся занятия по повышению квалификации специалистов диагностических служб генерирующих компаний топливно-энергетического комплекса России.

Заведующий кафедрой "ДЭО",

д.т.н., профессор

А.И. Таджибаев