

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

На правах рукописи



СТРАХОВ Александр Станиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ОБМОТОК РОТОРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Скоробогатов Андрей Александрович

Иваново – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. Анализ повреждаемости и существующих методов контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций.....	19
1.1. Повреждаемость и последствия повреждения обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми условиями пуска	19
1.1.1. Повреждаемость обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми условиями пуска	19
1.1.2. Последствия повреждений обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей для электрических станций.....	20
1.1.3. Оценка экономического ущерба электрических станций вследствие обрыва стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд.....	23
1.2. Особенности конструкции и режимов работы высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций.....	32
1.3. Обзор существующих методов контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в процессе эксплуатации.....	34
1.3.1. Регистрируемые сигналы, используемые при контроле наличия или отсутствия оборванных стержней	34
1.3.2. Методы контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в установившихся режимах.....	37
1.3.3. Методы контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в пусковых режимах.....	41
1.3.4. Методы обработки диагностических сигналов.....	44
1.3.5. Методы оценки технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей по результатам контроля	48

1.4. Выбор и обоснование методов и задач дальнейших исследований	51
Выводы по главе 1	54
Постановка задач исследования	55
ГЛАВА 2. Разработка алгоритма для анализа сигналов внешнего магнитного поля и тока статора при пуске высоковольтных двигателей электростанций в целях определения повреждения обмоток роторов.....	57
2.1. Постановка задачи.....	57
2.2. Анализ изменения частот гармонических составляющих, характеризующих наличие оборванных стержней, при пуске асинхронного двигателя	58
2.3. Оценка возможности влияния эксплуатационных факторов на амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора во внешнем магнитном поле в режиме пуска асинхронного двигателя.....	62
2.4. Исследование возможности применения оконного преобразования Фурье для построения частотно-временного спектра асинхронного двигателя при пуске.....	66
2.5. Вывод необходимых условий возможности применения оконного преобразования Фурье при анализе пусковых сигналов внешнего магнитного поля высоковольтных асинхронных электродвигателей с длительным пуском.....	73
2.6. Вывод необходимых условий возможности применения оконного преобразования Фурье при анализе пусковых сигналов тока статора высоковольтных асинхронных электродвигателей с длительным пуском.....	81
2.7. Разработка алгоритма в программном комплексе Matlab для анализа частотно-временных спектров высоковольтных асинхронных двигателей с длительным пуском в пусковых режимах	84
2.8. Проверка корректности разработанного алгоритма.....	87
Выводы по главе 2.....	91
ГЛАВА 3. Исследование влияния обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей электростанций с длительным пуском на математической модели.....	93
3.1. Постановка задачи.....	93

3.2. Разработка математических моделей высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд для анализа сигналов радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля при пуске.....	94
3.3. Анализ спектров сигналов внешнего магнитного поля на математических моделях высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд.....	98
3.4. Анализ спектров тока статора на математических моделях высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд.....	109
3.5. Моделирование процесса длительного пуска высоковольтной машины на модели двигателя малой мощности при подаче пониженного напряжения.....	115
3.6. Исследование спектров радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора на модели асинхронного двигателя малой мощности при пуске на пониженном напряжении.....	118
3.7. Сравнение чувствительности разработанных методов контроля технического состояния с существующими.....	128
3.7.1. Оценка чувствительности метода на основе сравнения пиковых значений амплитуд тока статора в течение пуска асинхронного электродвигателя.....	128
3.7.2. Оценка чувствительности метода на основе определения амплитуды характерной гармоники в спектре тока статора в установившемся режиме работы.....	130
3.7.3. Оценка чувствительности метода на основе определения амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора в спектре внешнего магнитного поля в установившемся режиме работы.....	132
3.7.4. Оценка чувствительности разработанного метода на основе определения амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора в спектре внешнего магнитного поля при пуске.....	135
3.7.5. Оценка чувствительности разработанного метода на основе определения амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора р- в спектре тока статора при пуске.....	136
3.7.6. Сравнение чувствительности рассмотренных методов контроля технического состояния.....	137

3.8. Оценка помехозащищенности сигнала внешнего магнитного поля высоковольтных асинхронных двигателей на электрических станциях.....	138
Выводы по главе 3.....	145
ГЛАВА 4. Экспериментальное исследование сигналов внешнего магнитного поля и тока статора высоковольтных асинхронных электродвигателей электростанций с длительным пуском.....	147
4.1. Постановка задачи.....	147
4.2. Совершенствование экспериментального стенда для проведения исследований сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля на низковольтном асинхронном электродвигателе	148
4.3. Экспериментальное исследование влияния обрыва стержней обмотки ротора на частотно-временные спектры низковольтного асинхронного двигателя малой мощности при искусственном затягивании пуска.....	151
4.3.1. Анализ влияния обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора на сигнал внутреннего магнитного поля реального асинхронного двигателя малой мощности при искусственно затянутом пуске	152
4.3.2. Анализ влияния обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора на сигнал внешнего магнитного поля реального асинхронного двигателя малой мощности при искусственно затянутом пуске	155
4.3.3. Анализ влияния обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора на сигнал тока статора реального асинхронного двигателя малой мощности при искусственно затянутом пуске.....	160
4.3.4. Сравнение полученных результатов на физической и математической моделях низковольтного маломощного асинхронного двигателя при искусственно затянутом пуске	162
4.4. Разработка методики проведения контроля технического состояния обрывов стержней обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей электростанций с длительным пуском по току статора и внешнему магнитному полю.....	166

4.5. Апробация разработанной методики проведения контроля технического состояния на реальных высоковольтных асинхронных двигателях собственных нужд электростанций	169
Выводы по главе 4.....	187
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	189
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	192
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	193
ПРИЛОЖЕНИЯ	212
Приложение 1. Оценка влияния величины питающего напряжения на время пуска асинхронного двигателя	213
Приложение 2. Режимные параметры асинхронного двигателя АИР71А6 при подаче пониженного напряжения в различных режимах	217
Приложение 3. Акты внедрения по результатам работы.....	220
Приложение 4. Патенты на изобретения на основе проведенных исследований	222

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время приводом большей части механизмов собственных нужд электрических станций являются асинхронные двигатели. Их надежная работа обеспечивает надежную работу генераторов и самой электростанции в целом. Хорошо известно, что одной из причин отказа асинхронных двигателей является обрыв стержней короткозамкнутых обмоток роторов, составляющий в среднем 5-10% от общего числа отказов.

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей можно разделить на две группы: литые, изготовленные из алюминия, и составные, которые в свою очередь подразделяются на одноклеточные (с одной обмоткой из меди) или двухклеточные (с пусковой, изготовленной из меди, и рабочей, изготовленной, как правило, из латуни, обмотками). Обрыв стержня в обмотках первой группы чаще всего является следствием некачественной заливки алюминия на стадии изготовления. Обрывы в обмотках второй группы могут быть обусловлены двумя причинами: некачественной пайкой стержня к короткозамкнутому кольцу при изготовлении и ремонте асинхронного двигателя, а также из-за влияния в процессе эксплуатации больших температурных и механических нагрузок на элементы обмотки ротора. Наиболее часто обрыв стержня возникает при пуске двигателя, поскольку пусковой ток в 5-7 раз выше значений номинального тока.

На электрических станциях многие асинхронные двигатели работают с тяжелыми условиями пуска. К ним относятся высоковольтные двигатели, которые являются приводами тягодутьевых механизмов (дымососов, дутьевых вентиляторов), а также механизмов топливоприготовления на пылеугольных станциях (мельницы, мельничные вентиляторы, дробилки). Длительность пускового режима для таких машин обычно составляет не менее 3 с, поэтому их можно называть асинхронными двигателями с тяжелыми длительными пусками. Количество отказов двигателей, работающих с тяжелыми условиями пуска,

связанное с обрывом стержней, может значительно превышать указанные ранее значения. Так, в ряде публикаций показано, что для высоковольтных асинхронных двигателей таких механизмов процент отказов вследствие повреждений обмоток роторов может достигать 30 % от общего числа отказов.

Обрывы стержней обмотки ротора высоковольтного асинхронного двигателя собственных нужд могут привести к серьёзному ущербу для электростанции, что сказывается на безотказности и экономичности ее работы. Во-первых, при работе с оборванными стержнями возрастают магнитные и электрические потери двигателя. Поэтому длительная эксплуатация высоковольтных асинхронных двигателей с оборванными стержнями может привести к значительному экономическому ущербу, так как в настоящее время электростанции сами оплачивают расходы электроэнергии и мощности на собственные нужды. Во-вторых, при работе оборванные стержни составной обмотки ротора могут отогнуться и повредить изоляцию лобовой части обмотки статора. Это приводит к необходимости дорогостоящего ремонта самого двигателя, поскольку отогнутый стержень может нанести ущерб изоляции обмотки или стали статора. При этом стоимость перемотки обмотки статора для высоковольтного асинхронного двигателя превышает 1 млн. руб. В ряде случаев может потребоваться и его замена. Наконец, повреждение обмотки статора отогнутым стержнем приводит к незапланированному останову ответственных механизмов (дымососов и дутьевых вентиляторов), а, следовательно, к снижению мощности котла или даже к полному его отключению. Так как время замены отказавшего асинхронного двигателя ответственных механизмов может составлять более суток, то появляется ущерб из-за недовыработки электроэнергии электростанцией и снижения ее вырабатываемой мощности. Величина годового ущерба по этой причине может составлять порядка сотни тысяч рублей. Поэтому проблема своевременного выявления обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей представляет существенный интерес для персонала электрических станций.

В настоящее время существует большое количество способов, которые с

достаточной точностью определяют наличие и количество оборванных стержней асинхронных двигателей в установившихся режимах на базе спектрального анализа сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитного полей, сигналов вибрации и т.д., так как обработка стационарных сигналов (в том числе и цифровая), имеющих достаточно большую длительность (более 5 с), производится значительно легче по сравнению с обработкой сигналов в переходных режимах (например, при пуске двигателя). По данной тематике проведено большое количество исследований как зарубежными авторами, так и в нашей стране.

При этом анализ условий работы высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе собственных нужд электрических станций, показывает, что наиболее целесообразно проводить контроль наличия оборванных стержней именно в режиме пуска, а не в установившемся режиме.

Во-первых, загрузка многих двигателей электрических станций при эксплуатации в нормальном режиме работы, в том числе вышеупомянутых высоковольтных машин с тяжелыми условиями пуска может быть значительно меньше номинальной. Например, Сыромятников И.А. отметил, что средняя загруженность тягодутьевых механизмов и механизмов топливоприготовления может составлять всего лишь 55% от номинальной нагрузки. Это существенно затрудняет процесс контроля технического состояния обмоток роторов в установившемся режиме работы, так как с уменьшением тока становятся менее выраженными электрические и электромагнитные признаки обрыва стержня.

Во-вторых, существует ряд механизмов собственных нужд, которые работают в режиме с резко изменяющейся нагрузкой (примерами таких механизмов на электростанциях могут служить мельницы и дробилки), что не позволяет осуществлять контроль технического состояния узлов их двигателей существующими методами, применяемыми в установившихся режимах.

В-третьих, в качестве асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, особенно на станциях старого образца, могут применяться машины с

двумя обмотками ротора – пусковой и рабочей. При этом чаще обрывы стержней происходят в пусковой обмотке, так как в режиме пуска величина тока значительно выше номинального. В установившемся режиме происходит перераспределение тока, большая его часть протекает уже по рабочей обмотке, что не позволяет производить качественный контроль пусковой обмотки существующими методами, применяемыми в установившихся режимах.

Методы контроля технического состояния обмоток роторов в пусковых режимах лишены этих недостатков и позволяют проводить контроль двигателей, работающих в условиях резкоизменяющейся нагрузки в процессе эксплуатации, малозагруженных двигателей, а также своевременно обнаруживать дефекты пусковой обмотки для двигателей с двумя обмотками ротора, так как режим пуска характерен для любого асинхронного двигателя, а пусковые токи не зависят от нагрузки машины. Кроме того, в пусковых режимах диагностические признаки должны быть более заметны, поскольку величины протекающих при пуске токов значительно выше. Однако эти методы сложны в реализации с точки зрения обработки сигнала и требуют достаточно длительного пуска (порядка 3 и более секунд), который характерен для асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска.

В ряде источников уделяется некоторое внимание методам контроля обрывов стержней в пусковых режимах, однако они в настоящее время не нашли практического применения или имеют ряд существенных недостатков. Кроме того, в существующих работах не уделяется внимание исследованию пускового сигнала внешнего магнитного поля, которое является одним из самых перспективных диагностических сигналов для контроля технического состояния узлов асинхронных двигателей. Поэтому разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе собственных нужд электростанций, в режиме пуска является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в область контроля технического состояния обмоток роторов при эксплуатации

асинхронных двигателей внесли многие исследователи в Российской Федерации и за рубежом: Вейнреб К., Сивокобыленко В.Ф., Волохов С.А., Добродеев П.Н., Савельев В.А., Назарычев А.Н., Рассказчиков А.В., Новоселов Е.М., Брюханов Г.А., Князев С.А., Сидельников Л.Г., Андреева О.А., Tavner P., Thomson W.T., Kliman G. B., Elkasabgy N.M., Fireteanu V., Culbert I., Donnell P. O., Romary R., Guedidi S., Kokko V., Negrea M.N. и др.

Метод выявления оборванных стержней на основе спектрального анализа тока статора в настоящее время является одним из самых распространенных и перспективных. В англоязычной литературе этот метод называется “Motor Current Signature Analysis” (сокращенно MCSA). В настоящее время этот метод подробно прописан в двух стандартах (ГОСТ ISO 20958-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя» и 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»). Также большое количество авторов занимается разработкой и совершенствованием подобных методов, например, Вейнреб К., Сафин Н.Р., Бурцев А.Г., Никиян Н.Г., Шевчук В.А., Thomson W. T., Gilmore R. J., Culbert I., Panadero R.P., Guedidi S., Fireteanu V., Tavner P., Lane M., Turk N., Thakur A., Kalaskar C. S. и др.

Возможность контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей по внешнему магнитному полю впервые в своих работах показали Kliman G. B., Elkasabgy N.M. и др. в 80-х годах на основе анализа спектра этого сигнала. Однако в последующие годы авторами как российских, так и зарубежных работ исследованию внешнего магнитного поля асинхронного двигателя уделяется очень малое внимание. В России одними из первых его исследовали Волохов С.А. и Добродеев П.Н. В настоящее время интерес к исследованию внешнего магнитного поля в целях контроля технического состояния двигателей вновь возрастает, что во многом связано с совершенствованием программных комплексов, позволяющих производить

полевые расчеты асинхронных двигателей (таких как Ansys Maxwell). В качестве авторов, занимающихся исследованием внешнего магнитного поля двигателей в установившемся режиме работы с применением подобных математических моделей, можно выделить Лукьянова А.В., Новоселов Е.М., Fireteanu V., Romary R., Pusca R. и др.

Исследованию же возможности контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в переходных режимах не уделяется должного внимания. Одними из первых большой вклад в развитие методов контроля при пуске двигателя по току статора внесли Брюханов Г.А. и Князев С.А. Рядом авторов были произведены исследования изменения механических характеристик двигателей при наличии неисправностей на математических моделях (Fiser R., Ferkolj S., Mini V. P, Ushakumari S.). Однако в настоящее время интерес к исследованию пусковых режимов вновь возрос из-за совершенствования методов обработки сигнала (таких как оконное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование). В связи с этим ряд авторов занимается исследованием спектров сигналов пускового тока статора (Сарваров А.С., Купцов В.В., Gritli Y., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R. и др.), однако большинство подобных работ находятся в разработке или имеют ряд существенных недостатков. Кроме того, ни в одной из существующих работ не проведено исследования внешнего магнитного поля при пуске и влияния на него повреждений обмоток роторов.

Целью работы является разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска, применяемых в системе собственных нужд электрических станций, по внешнему магнитному полю и току статора в пусковом режиме.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Статистический анализ повреждений обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления электростанций, а также статистический анализ неплановых простоев блоков, вызванных отказом указанных выше двигателей;

2. Анализ существующих методов контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в процессе эксплуатации и оценка возможности их применения для высоковольтных двигателей собственных нужд электростанций;

3. Разработка алгоритма для анализа частотно-временных спектров сигналов высоковольтных асинхронных двигателей электростанций при пуске на базе оконного преобразования Фурье и его апробация на тестовом сигнале, близком к пусковым сигналам высоковольтных асинхронных двигателей с длительным пуском;

4. Определение присутствующих во внешнем магнитном поле и токе статора при пуске диагностических признаков и параметров повреждения обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций за счет разработки в программном комплексе Ansys на основе метода конечных элементов моделей данных двигателей и исследования на основе разработанных моделей влияния обрывов стержней обмоток роторов на частотно-временные спектры сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля;

5. Разработка методики контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска на основе спектрального анализа пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и проверка работоспособности предлагаемой методики на экспериментальном стенде на низковольтном асинхронном двигателе при подаче пониженного напряжения для искусственного затягивания пуска и в ходе натурных экспериментов на реальных высоковольтных асинхронных двигателях механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления системы собственных нужд электростанций.

Объектом исследования являются высоковольтные асинхронные двигатели механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта системы собственных нужд электрических станций.

Предметом исследования является контроль технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта системы собственных нужд электростанции в режиме пуска по внешнему магнитному полю и току статора.

Методология и методы исследований. Поставленные задачи решались с использованием методов спектрального анализа нестационарных сигналов, теории магнитного поля, обработки экспериментальных данных, методов математического и физического моделирования. Основные результаты получены на основе вычислительных экспериментов с использованием возможностей математических пакетов Matlab и Ansys, физических экспериментов на низковольтном электродвигателе с исправной и поврежденной обмоток роторов, а также при проведении натурных экспериментов на реальных высоковольтных асинхронных двигателях системы собственных нужд электростанций.

Научную новизну работы представляют:

1. Новые диагностические признаки наличия оборванных стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе топливоприготовления и тягодутьевого тракта электростанций, заключающиеся в резком возрастании амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора в спектрах тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в пусковом режиме;

2. Разработанный алгоритм для анализа частотно-временных спектров высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками в пусковом режиме работы на основе оконного преобразования Фурье с обоснованием условий и требований для возможности его применения;

3. Метод контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками, основанный на оценке амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора первых порядков на верхних и нижних боковых

частотах в сигнале радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в пусковом режиме;

4. Метод контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками, основанный на оценке амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора на нижней боковой частоте порядка, совпадающего с числом пар полюсов, в сигнале тока статора при пуске.

Теоретическая значимость работы:

1. Показано, что сигналы радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора в режиме пуска несут диагностическую информацию, которая может быть использована в целях контроля технического состояния высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками;

2. Исследовано влияние динамического эксцентриситета и обрывов стержней обмоток роторов на гармонический состав радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта при пуске;

3. Доказана актуальность проводимых исследований путем оценки экономического ущерба электрической станции, который возникает вследствие обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта.

Практическая значимость результатов:

1. Повышение достоверности контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта электростанций по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и току статора при пуске за счет: исключения влияния динамического эксцентриситета и поведения нагрузки на результаты контроля; определения пороговых значений диагностических параметров на основе модельного анализа; повышения чувствительности к

обрыву одного стержня обмотки ротора;

2. Уменьшение числа незапланированных остановов или снижений мощности электростанций за счет раннего выявления обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд с тяжелыми длительными пусками;

3. Снижение экономических затрат электростанций на ремонты высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд с тяжелыми длительными пусками за счет раннего выявления обрывов стержней их обмоток роторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Диагностический признак обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, заключающийся в возрастании амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора первых порядков в сигнале радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в пусковом режиме;

2. Диагностический признак обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, заключающийся в возрастании амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора порядка, совпадающего с числом пар полюсов, на нижней боковой частоте в сигнале тока статора в пусковом режиме;

3. Методы контроля технического состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, основанные на анализе частотно-временных спектров радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора в пусковом режиме;

4. Методика проведения контроля технического состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, основанные на спектральном анализе радиальной составляющей индукции внешнего магнитного

поля и тока статора при пуске и определении пороговых значений на основе модельного анализа;

5. Алгоритм в программном комплексе Matlab, предназначенный для обработки пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля с обоснованием условий его применимости;

6. Результаты сравнения чувствительностей разработанных и существующих методов при обрыве одного стержня обмотки ротора на математической модели высоковольтного асинхронного двигателя собственных нужд.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректностью применения математических методов, апробированного специализированного программного обеспечения; совпадением теоретических результатов, результатов, полученных на математических моделях и результатов, полученных на экспериментальном стенде и реальных высоковольтных асинхронных двигателях собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками. Полученные результаты не противоречат основным положениям технических наук и согласуются с опубликованными результатами исследований, проведенных другими авторами.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Энергия» (г. Иваново, 2016 – 2021 гг.); на I региональной научно-технической конференции «Социум. Наука. Образование» (г. Иваново, 2016 г.); на XX и XXI международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (г. Иваново, 2019, 2021 гг.).

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены на ТЭЦ-2 г. Иваново, а также в учебный процесс и применяются при проведении лабораторных работ на кафедре электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования в Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина.

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в следующем: в постановке задач исследования; в анализе последствий повреждения обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд для электрической станции, включая их экономическую оценку; в анализе существующих методов контроля технического состояния короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных электродвигателей; в разработке алгоритма для анализа пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля асинхронных двигателей с длительными пусками на основе оконного преобразования Фурье; в описании гармонического состава сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в процессе пуска высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электрических станций; в выявлении диагностических признаков и параметров обрывов стержней обмотки ротора в спектрах пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля; в проведении измерений, сборе, обработке и анализе экспериментальных данных на математических моделях, экспериментальном стенде и в ходе натурного эксперимента; в разработке методов и методики проведения контроля технического состояния обмотки ротора асинхронного электродвигателя по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и току статора при пуске; в подготовке публикаций по результатам исследований.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 22 работы, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, и 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 150 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 223 страницы, в тексте содержится 124 рисунка и 42 таблицы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

1.1. Повреждаемость и последствия повреждения обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми условиями пуска

1.1.1. Повреждаемость обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми условиями пуска

Хорошо известно, что асинхронные двигатели (АД) являются электроприводами различных механизмов, применяемых в различных областях промышленности. Одной из таких областей являются электрические станции, где электродвигатели применяются в качестве приводов механизмов собственных нужд (СН). При этом можно выделить две группы АД механизмов СН электростанций – низковольтные и высоковольтные.

Одним из видов повреждения АД является обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора (ОР). Известно, что основные причины отказа АД связаны с повреждениями подшипников и обмотки статора. Средний же процент отказов, связанных с повреждением ОР, для АД составляет 5 – 10% от общего числа отказов [1-4]. Зарубежные исследования, проведенные IEEE IAS, EPRI и ALLIANZ [5-8], и в ряде других работ (например, в [9-11]) также показывают, что на повреждения ОР приходится приблизительно 10% от общего числа отказов.

Следует отметить, что чаще всего обрыв стержня происходит при пуске двигателей, так как при пуске величина протекающих по стержням токов в несколько раз выше, чем в установившемся режиме. Поэтому, как показано в ряде работ, доля отказов высоковольтных АД может значительно превышать среднестатистические параметры [11-14], особенно для двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта. Это связано с особенностями их работы и конструкции, которые рассмотрены в разделе 1.2. Например, в [14] показано, что доля отказов, связанных с обрывом стержней высоковольтных АД СН может составлять до 30% от общего числа отказов, а в [11] – до 20%. Кроме того, согласно [13], на ряде электрических станций около 35-40% двигателей работают с поврежденной ОР, что существенно сказывается на экономичности работы СН электростанции.

1.1.2. Последствия повреждений обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей для электрических станций

Хорошо известно, что обрыв одного стержня ОР высоковольтного АД чаще всего не приводит к нарушению работы механизма СН и не требует его немедленного останова. При этом обрыв даже малого количества стержней может привести к существенному возрастанию потребляемым двигателем электрической энергии и мощности. Известно, что на долю потребления двигателями механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта для пылеугольных электростанций в среднем приходится почти 50% от общего количества потребляемой электроэнергии [15]. В [13] показано, что даже при малом количестве оборванных стержней годовой ущерб от потерь электроэнергии может быть соизмерим со стоимостью самого АД.

При обрыве одного стержня происходит перераспределение тока по стержням ОР. В связи с этим соседние стержни оказываются в перегруженном состоянии и при последующих пусках также могут оборваться, что в дальнейшем

приведет к отказу двигателя и необходимости его ремонта. У высоковольтных АД СН электростанций оборванный стержень также может отогнуться и послужить причиной тяжелых повреждений самого АД и его вынужденного останова. В качестве примера на рис. 1.1 и 1.2 приведены фотографии с оборванным стержнем ОР АД типа АНЗ-4-16-45-10 на ТЭЦ-3 города Иваново и повреждения изоляции обмотки статора вследствие оборванных стержней соответственно. На рис. 1.3 и 1.4 показаны фотографии сабельного вылета стержней на Рязанской ГРЭС и ущерба статору АД соответственно. Другие примеры обрывов стержней ОР и нанесенных вследствие этого повреждений статору, приведенные в иностранных источниках, показаны на рис. 1.5-1.8 [16, 17].



Рис. 1.1. Обрыв стержней ОР АД типа АНЗ-4-16-45-10



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



Рис. 1.3. Сабельный вылет стержней ОР АД на Рязанской ГРЭС



Рис. 1.4. Повреждение обмотки статора АД на Рязанской ГРЭС из-за повреждения ОР

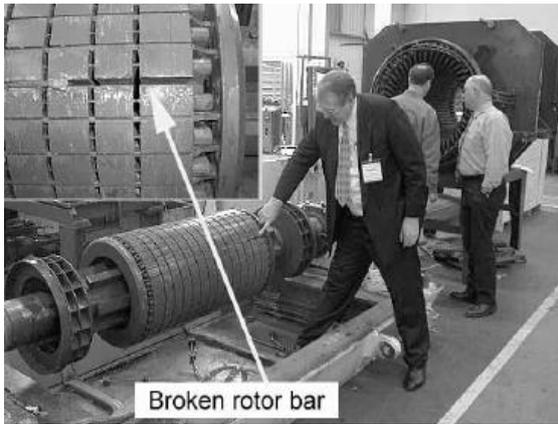


Рис. 1.5. Обрыв стержней ОР АД напряжением 11 кВ мощностью 2900 кВт [16]

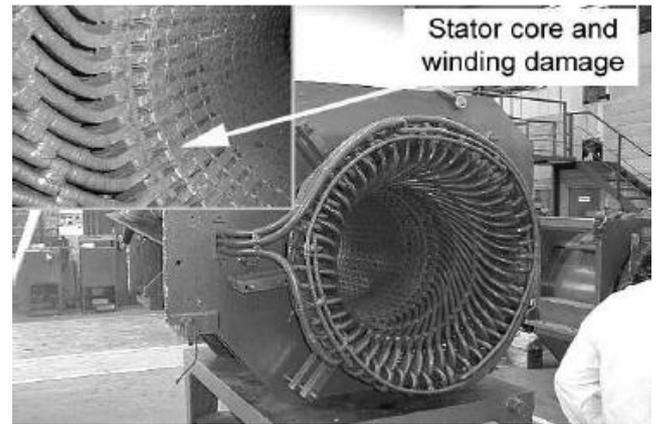


Рис. 1.6. Повреждение статора АД напряжением 11 кВ мощностью 2900 кВт из-за обрыва стержней ОР [16]



Рис. 1.7. Обрыв стержней ОР высоковольтного АД [17]



Рис. 1.8. Повреждение статора высоковольтного АД из-за обрыва стержней ОР [17]

Таким образом, из-за обрыва стержней ОР высоковольтных АД СН электрическая станция может понести ущерб как при длительной работе двигателя с оборванными стержнями, так и вследствие непосредственных отказов АД. Возможны два основных последствия отказов: необходимость ремонта самого двигателя при повреждении стали или изоляции обмотки статора, а также возможное снижение вырабатываемой электростанцией мощности и электрической энергии вследствие отключения агрегата СН (из-за полного или частичного отключения блока). Особенно серьезный ущерб от потери мощности электростанции может возникнуть при повреждении двигателей ответственных механизмов, например, механизмов тягодутьевого тракта.

Поэтому в ходе анализа выделено три основные причины возможного экономического ущерба для электрических станций, которые возникают

вследствие работы высоковольтного АД СН с оборванными стержнями короткозамкнутой ОР или при его отказе по этой причине:

1) ущерб из-за необходимости ремонта АД вследствие отказа, когда обрыв стержней может привести к повреждению изоляции обмотки или стали статора.

2) ущерб из-за незапланированного отключения блока электростанций или снижения его мощности, по причине отключения ответственных механизмов СН вследствие отказов высоковольтных АД;

3) ущерб, связанный с ростом потребления мощности и электроэнергии на СН электростанции, вызванный увеличением потерь в АД при их работе с поврежденными ОР.

1.1.3. Оценка экономического ущерба электрических станций вследствие обрыва стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд

Оценим значимость описанных выше трех составляющих экономического ущерба для электростанции.

Поскольку обрыв стержня короткозамкнутой ОР высоковольтных АД может привести к повреждению обмотки или стали статора, то в результате такого повреждения может потребоваться как ремонт АД, так и его возможная замена. При этом стоимость ремонта может быть сопоставима со стоимостью самого двигателя. Например, стоимость ремонта АД типа АНЗ-4-16-45-10 на ТЭЦ-3 города Иваново при повреждении изоляции обмотки статора вследствие оборванных стержней (рис. 1.2) составила 800 тыс. руб. при стоимости самого АД 3,5 млн.руб. (цены на 2009 год).

Для оценки второй составляющей экономического ущерба были запрошены статистические данные по обнаружению оборванных стержней в ходе ремонта высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска (дутьевых вентиляторов,

дымососов, мельниц, дробилок, мельничных вентиляторов) и количеству произошедших по этой причине отказов, полученных на двух ГРЭС, расположенных в центральных районах России и работающих на угле, за 20 и 35 лет соответственно. Данные по количеству обнаруженных поврежденных двигателей на этих станциях представлены в таблицах 1.1 и 1.2. Из представленных данных видно, что на обеих станциях на некоторых АД в ходе ремонта было обнаружено более 10 оборванных стержней. В некоторых случаях потребовалась замена ротора АД.

В таблицах 1.3 и 1.4 приведены данные по количеству и длительности снижения мощности блоков электрической станции вследствие останова механизмов СН из-за отказов высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска для оценки величины экономического ущерба. Видно, что на рассматриваемых электрических станциях неоднократно происходили остановки АД вследствие обрывов стержней, что связано с повреждениями изоляции обмотки статора и стали статора. Отказ электродвигателей механизмов тягодутьевого тракта приводил к вынужденному снижению мощности блока длительностью 32-64 часов, а топливоприготовления – длительностью 1 час. При этом при отказе АД механизмов тягодутьевого тракта мощность блоков вынужденно снижалась на 50 % на ГРЭС №1, и на 100 % – на ГРЭС №2.

На основании полученных данных произведена оценка экономического ущерба. Расчёт произведен на основе следующих документов:

1. Порядок установления соответствия генерирующего оборудования участников оптового рынка техническим требованиям, утвержденный Заместителем Председателя Правления АО «СО ЕЭС» (Москва, с 01.06.2021);

2. Приложение 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент определения объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности (от 26.01.2021 г.).

Таблица 1.1. Количество обнаруженных в ходе ремонтов оборванных стержней ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска за последние 20 лет на ГРЭС №1

Вид рабочей машины	Наименование рабочей машины	Количество двигателей, у которых обнаружены оборванные стержни либо разрывы колец за 20 лет	Количество оборванных стержней в ОР, определенных при ремонте, год проведения ремонта			
Дутьевые вентиляторы	ДВ-1А	13	3 стержня, 1999г.			
			2 стержня, 2010г.			
			18 стержней, 2018г.			
	ДВ-2А		3 стержня, 2007г.			
			4 стержня, 2002г.			
			6 стержней, 2001г.			
			24 стержня, 2001г.			
			2 стержня, 2001г.			
			28 стержней, 2002г.			
			3 стержня, 1999г.			
	ДВ-3А		8 стержней, 2000г.			
			18 стержней, 2000г.			
			2 стержня, 2008г.			
ДВ-3Б	1М-6	Замена ротора, 2001г.				
		2 стержня, 2003г.				
Мельницы	1М-7	7	Замена ротора, 2006г.			
			4 стержня, 2001г.			
			2 стержня, 2008г.			
			1 стержень, 1999г.			
			Замена ротора, 2002г.			
			ДМ-1	ДМ-1	5	4 стержня, 2008г.
						14 стержней, 2008г.
5 стержней, 2011г.						
3 стержня, 2014г.						
ДМ-2	ДМ-2	5	6 стержней, 2018г.			
			ДМ-3			
ДМ-3	ДМ-3	5				
			ДМ-4			
Дробилки	ДМ-4	5				

Таблица 1.2. Количество обнаруженных в ходе ремонтов оборванных стержней ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска за последние 35 лет на ГРЭС №2

Вид рабочей машины	Наименование рабочей машины	Количество двигателей, у которых обнаружены оборванные стержни либо разрывы колец за 35 лет	Количество оборванных стержней в обмотке ротора, определенных при ремонте, год проведения ремонта
1	2	3	4
Дымососы	ДС-10А	5	2 стержня, 1994г.
			3 стержня, 2004г.
	ДС-10Б		1 стержень, 2010г.
			3 стержня, 1985г.
Дутьевые вентиляторы	ДВ-10А	6	1 стержень, 1994г.
			1 стержень, 1980г.
	ДВ-9А		1 стержень, 1994г.
			1 стержень, 1980г.
	ДВ-9Б		1 стержень, 1984г.
			3 стержня, 2002г.
Мельницы	М-3А	21	5 стержней, 1983г.
			6 стержней, 1984г.
			40 стержней, 1986г.
			6 стержней, 1988г.
	М-3Б		6 стержней, 1976г.
			2 стержня, 1980г.
			20 стержней, 1982г.
			4 стержня, 1983г.
			12 стержней, 1984г.
			35 стержней, 1987г.
			5 стержней, 1980г.
			8 стержней, 1976г.
	М-4А		14 стержней, 1977г.
			5 стержней, 1978г.
			4 стержня, 1980г.
			5 стержней, 1988г.
М-4Б	8 стержней, 1992г.		
	14 стержней, 1982г.		
	18 стержней, 1979г.		
	8 стержней, 1982г.		
М-5А	2 стержня, 1986г.		
	3 стержня, 1977г.		
М-5Б	4 стержня, 1982г.		
	3 стержня, 2008г.		
Дробилки	Дробилка №5	4	4 стержня, 1977г.
			3 стержня, 1977г.
	Дробилка №8		4 стержня, 1982г.
			4 стержня, 1977г.

Таблица 1.2. Количество обнаруженных в ходе ремонтов оборванных стержней ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска за последние 35 лет на ГРЭС №2 (продолжение)

1	2	3	4
Мельничные вентиляторы	МВ-9А	7	1 стержень, 1977г.
	МВ-10Б		2 стержня, 2005г.
			3 стержня, 2006г.
			3 стержня, 2011г.
	МВ-10В		1 стержень, 1985г.
	МВ-11А		2 стержня, 1980г.
МВ-11Б	1 стержень, 2003г.		

Таблица 1.3. Количество и продолжительность незапланированных остановов агрегатов вследствие обрывов стержней ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска за последние 20 лет на ГРЭС №1

Вид рабочей машины	Количество незапланированных отключений агрегата, вызванных повреждением ОР	Среднее время восстановления работы (замены) агрегата, ч	Снижение мощности блока, %
Дутьевые вентиляторы	1	64 часа (8 смен)	50%
Мельницы	7	1 час	12%
Дробилки	5	-	-

Таблица 1.4. Количество и продолжительность незапланированных остановов агрегатов вследствие обрывов стержней ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска за последние 35 лет на ГРЭС №2

Вид рабочей машины	Количество незапланированных отключений агрегата, вызванных повреждением ОР	Среднее время работы блока с пониженной мощностью, ч	Снижение мощности блока, %
Дымососы	1	32 часа (4 смены)	100%
Дутьевые вентиляторы	1	32 часа (4 смены)	100%
Мельницы	11	1 час	7%
Дробилки	2	-	-
Мельничные вентиляторы	4	1 час	10%

Значения стоимостей электрической энергии и мощности принимались равными средним величинам и составили 1,237 руб/кВт·ч и 161,927 руб/кВт

соответственно. Величина экономического ущерба оценивалась по следующей формуле:

$$U = K \cdot \Delta P \cdot C_p \cdot t_{откл} + \Delta P \cdot C_w \cdot t_{откл} \quad (1.1)$$

где K – повышающий коэффициент 1.5, регистрируемый Системным Оператором при фактическом снижении максимальной мощности включенного оборудования;

ΔP – величина снижения нагрузки блока, кВт;

C_p – цена МВт мощности на Конкурентном Отборе Мощности в 2021 г, руб/кВт;

$t_{откл}$ – время отключения, ч;

C_w – средняя цена электроэнергии в 2021 г., руб/кВт·ч.

Результаты расчета представлены в таблицах 1.5 и 1.6. Из представленных результатов видно, что по современным значениям стоимости электрической энергии и мощности экономический ущерб вследствие отказов высоковольтных АД составил бы примерно 2 млн. руб. на ГРЭС №1 и примерно 3,9 млн. руб. на ГРЭС №2. Удельный ущерб (средняя величина экономического ущерба за один год) составляет приблизительно 100 тыс. руб. для обеих рассмотренных электрических станций.

Для оценки последней составляющей ущерба произведено исследование влияния оборванных стержней на величину потерь мощности АД и, следовательно, на потребляемую двигателем активную мощность и электрическую энергию. Исследования были проведены на математической модели АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1, являющегося приводом дымососов на ТЭЦ-3 города Иваново, разработанной в программном комплексе Ansys. Описание математической модели приведено в третьей главе диссертационной работы.

Таблица 1.5. Величина экономического ущерба вследствие снижения вырабатываемой мощности и электрической энергии электростанцией при отказах высоковольтных АД СН с тяжелыми условиями пуска на ГРЭС №1

Тип механизма	Экономический ущерб, руб.
Дутьевые вентиляторы	1 933 297 (1 отказ)
Мельницы	82 357 (7 отказов)
Дробилки	-
Σ	2 015 654

Таблица 1.6. Величина экономического ущерба вследствие снижения вырабатываемой мощности и электрической энергии электростанцией при отказах высоковольтных АД СН с тяжелыми условиями пуска на ГРЭС №2

Тип механизма	Экономический ущерб, руб.
Дымососы	1 893 804 (1 отказ)
Дутьевые вентиляторы	1 893 804 (1 отказ)
Мельницы	50 317 (11 отказов)
Мельничные вентиляторы	26 138 (4 отказа)
Дробилки	-
Σ	3 864 063

На компьютерной модели оценивалось изменение как суммарной величины потерь АД, так и их отдельных составляющих, а именно:

1) магнитных потерь, включающих потери на гистерезис и вихревые токи. Также отдельно рассмотрены значения магнитных потерь в статоре и роторе;

2) электрических потерь в ОР;

3) электрических потерь в обмотке статора.

Значения потерь оценивались в следующих случаях:

- 1) для исправного АД при номинальной нагрузке;
- 2) для исправного АД при нагрузке, составляющей 50% от номинальной;
- 3) для АД с 10 оборванными стержнями ОР при номинальной нагрузке;
- 4) для АД с 10 оборванными стержнями ОР при нагрузке, составляющей 50% от номинальной;
- 5) для АД с 20 оборванными стержнями ОР при номинальной нагрузке;
- 6) для АД с 20 оборванными стержнями ОР при нагрузке, составляющей 50% от номинальной.

Результаты расчета потерь приведены в таблицах 1.7 и 1.8. Из представленных результатов видно, что наличие 10 и 20 оборванных стержней ОР (а такое количество оборванных стержней было обнаружено у нескольких АД на электростанциях, как видно из представленных статистических данных (таблицы 1.1 и 1.2)) приводит к возрастанию потерь до 30% относительно значения при исправной ОР. Так как возрастание потерь существенно при большом количестве оборванных стержней, то необходимо оценить годовой экономический ущерб, возникающий из-за работы АД в течение года с оборванными стержнями.

Методика оценки экономического ущерба аналогична той, которая использовалась при оценке ущерба вследствие снижения вырабатываемой мощности и электроэнергии электрической станцией. Для упрощения расчета было принято, что двигатель работает 8760 часов за год. При стоимости электроэнергии 1,237 руб/кВт·ч и мощности 161,927 руб/кВт суммарный годовой ущерб, вызванный увеличением расхода электроэнергии и мощности на СН электростанции из-за обрыва 10 (20) стержней моделируемого АД, составит 21 522 (52 909) рублей при работе АД с номинальной нагрузкой и 7 174 (15 757) рублей при его загрузке на 50%. Для наглядности полученные результаты представлены в таблице 1.9. Из представленных результатов видно, что, хотя величина годового экономического ущерба вследствие увеличения невелика (составляет около 50 тыс. рублей даже при работе АД с 20 оборванными стержнями при номинальной нагрузке), однако длительная работа АД с большим количеством оборванных стержней может также привести к существенному экономическому ущербу. Например, работа только одного двигателя с 20 оборванными стержнями с нагрузкой, близкой к 100%, в течение 10 лет приведёт к ущербу, составляющему приблизительно 520 тыс. руб. Кроме того, значение ущерба резко возрастает при одновременной работе на электростанции большого количества АД с оборванными стержнями ОР.

Таблица 1.7. Значение потерь АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 при номинальной нагрузке

Число оборванных стержней	0	10	20
Магнитные потери, кВт	3,81	4,3	4,8
Магнитные потери (ротор), кВт	$5,42 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$
Магнитные потери (статор), кВт	3,75	4,2	4,7
Потери на вихревые токи, кВт	0,48	0,55	0,615
Потери на гистерезис, кВт	3,33	3,8	4,2
Электрические потери в роторе, кВт	3,03	3,4	3,9
Электрические потери в статоре, кВт	5,7	6,5	8
Суммарные потери, кВт	12,52	14,2	16,65

Таблица 1.8. Значение потерь АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 при нагрузке, равной 50% от номинальной

Число оборванных стержней	0	10	20
Магнитные потери, кВт	3,86	4,1	4,38
Магнитные потери (ротор), кВт	$4,32 \cdot 10^{-2}$	$5,21 \cdot 10^{-2}$	$6,73 \cdot 10^{-2}$
Магнитные потери (статор), кВт	3,82	4,04	4,31
Потери на вихревые токи, кВт	0,489	0,515	0,542
Потери на гистерезис, кВт	3,37	3,57	3,82
Электрические потери в роторе, кВт	1,07	1,16	1,21
Электрические потери в статоре, кВт	2,83	3,04	3,35
Суммарные потери, кВт	7,67	8,23	8,9

Таблица 1.9. Экономический ущерб электростанции вследствие увеличения потерь АД из-за обрывов стержней ОР

Число оборванных стержней	10		20	
Нагрузка электродвигателя в процентах от номинальной	50%	100%	50%	100%
Годовой ущерб вследствие увеличения потребляемой мощности, руб	1 088	3 264	2 390	8 025
Годовой ущерб вследствие увеличения потребляемой электрической энергии, руб	6 086	18 258	13 367	44 883

Таким образом, вопросы контроля технического состояния ОР высоковольтных АД СН электростанций с тяжелыми условиями пуска являются актуальными и требуют проведения исследования с учетом особенностей работы двигателей механизмов СН.

1.2. Особенности конструкции и режимов работы высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций

Известно, что с точки зрения выполнения ОР можно выделить две группы АД СН на электрических станциях: низковольтные двигатели выполняются с литой ОР, в то время как высоковольтные выполняются с составной ОР или с двумя ОР (двойной беличьей клеткой). Наиболее вероятен обрыв стержня именно для двигателей с составной обмоткой, то есть для высоковольтных АД.

Как уже было отмечено ранее, чаще всего обрывы стержней происходят на АД механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта электростанций. Это связано с тяжелыми условиями пуска этих механизмов. В первую очередь можно отметить длительное время пуска АД этих механизмов, которое для большинства подобных электродвигателей составляет не менее 3 секунд, высокие пусковые токи и прямой пуск этих двигателей. В качестве примера в таблице 1.10 приведены длительности пусков электродвигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта на рассматриваемых двух ГРЭС. Для АД механизмов топливоприготовления характерны также частые пуски, количество которых может составлять более 600 раз в год. По этой причине и доля отказов АД СН вследствие обрывов стержней значительно превышает среднестатистические значения.

Перед анализом существующих методов контроля технического состояния асинхронных электродвигателей в процессе эксплуатации следует произвести анализ особенностей высоковольтных АД СН, которые могли бы усложнить процесс диагностирования.

В первую очередь можно отметить большое количество стержней ОР. По сравнению с низковольтными АД, количество стержней у рассматриваемых машин может превышать 100, поэтому своевременное обнаружение обрыва одного стержня для подобных двигателей значительно сложнее и требует создание более чувствительных методов контроля.

Таблица 1.10. Продолжительность пусков асинхронных электродвигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта собственных нужд электростанций

Наименование электростанции	Вид рабочей машины	Тип АД	Продолжительность пуска агрегата, сек
ГРЭС №1	Дымососы	АО2-21-39-16У	10 – 12
	Дутьевые вентиляторы	ДАЗО-2-18-59-6/8У1	8 – 10
	Мельницы	ДАЗО-2-17-54-10У1	6 – 7
		ДАЗО-15-49-8У	6 - 9
	Дробилки	АНЗ-16-44-12А	12
		АДО-1250/600У3	12
ГРЭС №2	Дымососы	ДАЗО-1910-12	8-10
	Дутьевые вентиляторы	ДАЗО-15-69-8/10	5-8
	Мельничные вентиляторы	АЗ-13-46-4	3
		ДАЗО-1508-4	3
	Дробилки	АНЗ-16-44-12	8

Как упоминалось ранее, ряд двигателей на электростанциях выполняется с двойной беличьей клеткой. Пусковая обмотка выполняется из латуни, рабочая обмотка выполняется из меди. В связи с этим во время пуска большая часть тока протекает по пусковой обмотке, а по окончании пуска – по рабочей. Обрыв стержней чаще всего происходит в процессе пуска, поэтому предпочтительнее для СН электростанций контроль производить именно в пусковом режиме работы.

Другой особенностью работы является то, что нагрузка АД СН электростанций часто бывает значительно меньше номинальной. Так, в [18] отмечается, что средняя нагрузка АД механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления может составлять 55-80% от номинальной. Это также необходимо учитывать, поскольку диагностические признаки обрыва стержней при более низких нагрузках будут проявляться менее отчетливо, чем при номинальной нагрузке.

Наконец, двигатели механизмов топливоприготовления на пылеугольных электрических станциях характеризуются отсутствием установившегося режима работы, так как в процессе эксплуатации нагрузка подобных механизмов изменяется с течением времени. Этот фактор существенно усложняет процесс

контроля подобных двигателей в установившемся режиме, поэтому также должен осуществляться именно при его пуске.

Таким образом, в ходе анализа режимов работы высоковольтных АД СН был сделан вывод о том, что для контроля технического состояния таких двигателей наиболее подходящими будут методы в пусковом режиме работы.

1.3. Обзор существующих методов контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в процессе эксплуатации

В настоящее время существует большое количество разнообразных методов контроля технического состояния ОР АД, основанных на измерении различных параметров АД, использующие разнообразные методы для обработки сигналов и т.д. Поэтому для удобства анализ существующих методов контроля разделен на отдельные этапы, в качестве которых выделены:

- 1) Анализ используемых для контроля регистрируемых сигналов;
- 2) Анализ диагностических параметров, характеризующих наличие обрывов стержней АД, и методов их определения;
- 3) Анализ существующих методов обработки сигнала, которые применяются для выделения в сигнале необходимого диагностического параметра;
- 4) Анализ применяемых методов определения технического состояния двигателя, основанных на определении пороговых значений, соответствующих нахождению АД в исправном или неисправном состоянии.

1.3.1. Регистрируемые сигналы, используемые при контроле наличия или отсутствия оборванных стержней

Обрыв стержня короткозамкнутой ОР приводит к нарушению осевой симметрии двигателя, что сказывается на распределении поля внутри и снаружи

АД, изменении тока статора, возникновению вибрации и т.д. В связи с этим в подобных сигналах отчетливо проявляются признаки, которые характеризуют обрывы стержней. Рассмотрим основные применяемые на практике регистрируемые сигналы:

1. **Сигнал внутреннего магнитного поля АД.** Методы контроля на основе использования внутреннего магнитного поля являлись одними из первых методов контроля технического состояния [12, 19-23]. Возникновение повреждений ОР приводило к существенному изменению распределения поля внутри воздушного зазора и возникновению его несимметрии. Однако существенным недостатком использования подобного диагностического сигнала является требования установки датчика или датчиков внутри воздушного зазора машины. Если производить контроль при эксплуатации АД, установленные датчики сами могут послужить причиной аварии машины.

2. **Сигналы вибрации (вибрационный контроль).** Хорошо известно, что в нашей стране вибрационный контроль является одним из ведущих направлений диагностики АД. Поэтому в настоящее время большое количество публикаций посвящено развитию методов вибрационной диагностики и разработано большое количество устройств, производящих измерения и анализ вибрационных сигналов. Кроме того, существует ГОСТ ISO 20958-2015 [24], в котором подробно описывается методика проведения вибрационной диагностики. Но чаще всего этот метод применяется для обнаружения механических повреждений АД, например, повреждения их подшипников [25-27]. В ряде работ показана возможность применения подобного метода контроля и для выявления обрывов стержней ОР [28-32, 120, 125, 126]. Однако большинство авторов, занимающихся вибродиагностикой, отмечают, что чувствительность методов контроля на основе анализа вибрации недостаточно высокая для выявления повреждений ОР.

3. **Сигнал тока статора.** В настоящее время ток статора является одним из наиболее эффективных диагностических сигналов, используемых как для выявления оборванных стержней, так и других неисправностей АД, в связи с чем

многие российские [19, 33-43, 89] и зарубежные [22, 23, 25, 32, 44-88, 121-124] авторы уделяют большое внимание его исследованию в качестве сигнала, несущего информацию о дефекте электродвигателей. Кроме того, имеется штатный метод и устройство для контроля обрыва стержней [90], на базе метода, прописанного в [36, 37], а также межгосударственные стандарты (ГОСТ ISO 20958-2015 и ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015) [91, 92], в которых большое внимание уделяется описанию методики обнаружения неисправностей на базе спектрального анализа тока статора. Следует отметить, что существуют методы контроля, основанные на регистрации сигнала тока статора как в установившемся режиме (например, [38-87]), так и в ходе пуска двигателя ([36, 37, 43, 88, 89]). Такое внимание связано с доступностью и удобством регистрации тока статора, единственным недостатком которого является необходимость доступа к токовым цепям.

4. **Сигналы внешнего магнитного поля (ВМП).** Это направление контроля АД на текущий момент мало изучено, но является перспективным. Под ВМП понимается магнитное поле за пределами корпуса двигателя. В многочисленных работах на математических моделях и в ходе реальных экспериментов было показано, что за пределами корпуса электродвигателя можно не только зафиксировать все три составляющие внешнего поля (радиальную [93-98], аксиальную [80, 95, 98-103, 125] и тангенциальную составляющие [30, 104]), но и выявить диагностические параметры, характеризующие наличие неисправностей. Сигналы ВМП являются легкодоступными и не требуют доступа к токовым цепям и воздушному зазору двигателя. Однако их недостатком является то, что амплитуда сигнала за пределами корпуса АД очень мала, что значительно затрудняет процесс проведения контроля, особенно для машин, корпуса которых выполнены из магнитных материалов. Поэтому для его регистрации требуются очень чувствительные датчики. Другим недостатком является то, что чем выше частота гармонических составляющих сигнала, тем более слабо они проявляются во внешнем поле, поэтому в спектрах подобных сигналов отчётливо проявляются лишь низкочастотные гармоники.

1.3.2. Методы контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в установившихся режимах

В настоящее время все методы контроля технического состояния двигателей в установившихся режимах можно разделить на 3 группы:

1. Графический метод на основе сравнения значений диагностических параметров. Данные методы основаны на построении годографа по результатам измерения в нескольких точках или нескольких контролируемых величин. Можно выделить две группы подобных методов:

1.1. По сравнению величины магнитного поля в нескольких точках. Принцип подобных методов контроля заключается в том, что значения амплитуд магнитного поля производится в нескольких точках с дальнейшим сравнением. Подобные методы могут использоваться как при анализе магнитного поля внутри воздушного зазора [12], так и при анализе аксиальной составляющей ВМП [30, 103] (в качестве примера на рис. 1.9 приведены точки измерения для аксиальной составляющей ВМП [30]). Поскольку при возникновении повреждения ОР возникает несимметрия магнитного поля, подобное сравнение позволяет оценивать наличие или отсутствие оборванных стержней.

1.2. Анализ годографа вектора Парка тока статора. Принцип действия методов на основе анализа вектора Парка заключается в том, что трехфазная система токов статора представляется двумя комплексными составляющими, обозначаемых i_d и i_q . Значения этих токов могут быть определены по выражениям:

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}}i_A - \sqrt{\frac{1}{6}}i_B - \sqrt{\frac{1}{6}}i_C, \\ i_q &= \sqrt{\frac{1}{2}}i_B - \sqrt{\frac{1}{2}}i_C. \end{aligned} \tag{1.2}$$

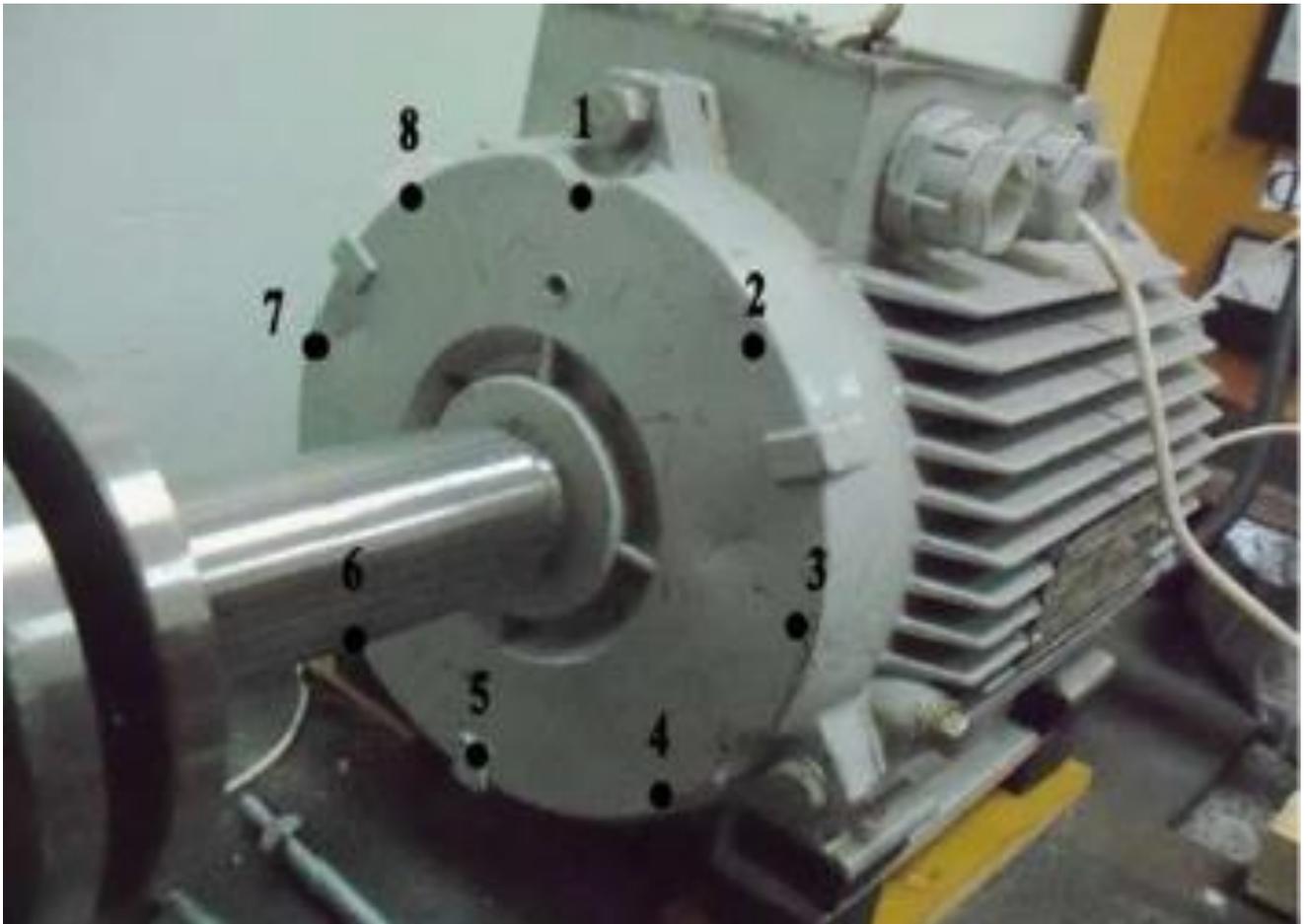


Рис. 1.9. Точки измерения напряженности ВМП АД

После этого строится годограф токов вектора Парка, по которому и оценивается техническое состояние АД. Подобные методы наиболее часто используются для определения повреждений АД, не связанных с дефектами ОР [44, 57, 61, 86]. Однако для обнаружения обрывов стержней ОР применяется спектральный анализ модуля вектора Парка, низкочастотные составляющие в котором могут нести диагностическую информацию [4, 87].

2. По анализу формы диагностического сигнала. Повреждение ОР АД приводит к тому, что форма перечисленных ранее диагностических сигналов изменяется. Однако эти изменения незначительны, поэтому оценка технического состояния подобным методом практически не применяется. Однако многие авторы отмечают, что при использовании соответствующей предварительной обработки зарегистрированного сигнала становится возможным обнаруживать дефекты и по виду сигнала.

Наиболее распространенным направлением контроля, основанным на анализе формы диагностического сигнала, является анализ огибающей тока статора. Под огибающей принято понимать линию, соединяющую соседние экстремумы сигнала, то есть точки, в которых амплитуда сигнала максимальна за период. Многие авторы отмечают, что характер огибающей существенно изменяется при возникновении обрыва, так как в сигнале появляются низкочастотные составляющие с достаточно высокими для выявления амплитудами, по которым можно визуальное определить наличие или отсутствие обрывов ОР [55, 63].

К графическим методам также можно отнести методы, основанные на анализе сигнала после произведенной фильтрации ряда гармонических составляющих. Подробнее такие методы рассмотрены в третьем подпункте (методах спектрального анализа).

3. Методы контроля на основе спектрального анализа. В настоящее время методы контроля технического состояния ОР на основе спектрального анализа являются наиболее перспективными и хорошо изученными. Исследованиями спектров сигналов АД занимаются многочисленные авторы. Также в 2015 году введен межгосударственный стандарт, посвященный применению спектрального анализа при контроле технического состояния АД по сигналам тока статора, внешнего и внутреннего магнитных полей и т.д. [91].

Чаще всего при использовании методов спектрального анализа в качестве диагностического признака наличия обрывов стержней выступает возрастание амплитуд одной или нескольких гармонических составляющих, которые в [20] названы гармониками от фиктивной обмотки ротора (ФОР), частоты которых могут быть определены по выражению:

$$f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right), \quad (1.3)$$

где f_c – частота сети; p – число пар полюсов; v – порядок гармоники; s – скольжение.

Однако в ряде работ выделены и иные гармоники, по которым можно оценить наличие или отсутствие повреждений ОР. Также необходимо отметить и большое количество методик, использующие описанные ранее методы предварительной обработки зарегистрированных сигналов. Для удобства все используемые при контроле гармонические составляющие сведены в табл. 1.11. В таблице также приведены и сигналы, для которых возможно обнаружить эти гармонические составляющие.

Таблица 1.11. Частоты гармонических составляющих, характеризующих дефекты обмотки ротора

№	Частота используемых гармоник, Гц	Список источников, в которых предложены гармоники	Диагностические сигналы, в которых проявляются гармоники
1	$f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right)$, для тока статора проявляются лишь гармоники с частотами, для которых величина v/p составляет 1, 5, 7, 11, 13 и т.д.	[20-23], [22, 23, 68, 79, 80], [13, 21, 22, 65, 94, 97, 98]	Внутреннее магнитное поле, ток статора, внешнее магнитное поле
2	$f_c \cdot (1 \pm 2s)$	[28-31], [4, 16, 17, 23, 25, 34, 47, 51, 52, 57, 61, 66, 67, 70-73, 75, 78-80, 82, 122], [99, 101]	Вибрационные сигналы, ток статора, внешнее магнитное поле
3	$f_c \cdot (1 \pm 2ks)$	[46, 54, 56, 62, 83-85, 124]	Ток статора
4	$f_{N_{ром}} = f_c \cdot (1 \pm N_r \cdot \frac{1-s}{p})$, $f_c \cdot (1 \pm N_s \cdot \frac{1-s}{p})$, где N_r – число пазов ротора; N_s – число пазов статора.	[93], [42, 81]	Ток статора, внешнее магнитное поле
5	$f_c \cdot (2k+1)$	[30]	Внешнее магнитное поле
6	$f_c \cdot s \cdot (1+2k)$	[94-96, 100, 102, 105, 106]	Внешнее магнитное поле
7	$2 \cdot f_c \cdot s, 4 \cdot f_c \cdot s$	[55, 64], [4, 87]	Огибающая тока статора, модуль вектора Парка тока статора

На основе методов спектрального анализа могут использоваться методы, основанные на фильтрации гармоник из диагностического сигнала. Поскольку

обрыв стержня приводит к возрастанию амплитуды характерных гармоник, то форма сигнала, состоящего только из этих гармоник, может наглядно показывать не только наличие или отсутствие дефекта, но и количество оборванных стержней ОР. В качестве примера в [20] приведена подобная методика для сигнала внутреннего магнитного поля.

1.3.3. Методы контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в пусковых режимах

Анализ сигналов в пусковых режимах имеет существенные преимуществами перед контролем в установившихся режимах работы, связанных с возможностью контроля любых АД независимо от того, приводами каких механизмов они являются. Так, в процессе эксплуатации невозможно производить контроль двигателей ряда механизмов, примером которых могут служить дробилки на электрических станциях, так как в процессе эксплуатации их нагрузка с течением времени может существенно изменяться. Однако сложностью анализа пусковых режимов является то, что частоты гармоник сигналов в процессе пуска существенно изменяются, что связано с изменением скорости вращения и скольжения АД. В связи с этим количество работ, посвященных анализу пусковых режимов, невелико. Рассмотрим основные из предложенных в публикациях методы:

- 1) Оценка наличия неисправностей по времени пуска электродвигателя. В [107] указывается, что любая неравномерность магнитного потока АД приводит к изменению его времени пуска. Чем больше неравномерность воздушного зазора, тем большее время потребуется для пуска электродвигателя. Таким образом, возникновение неисправности можно оценивать по длительности пуска. Однако увеличение времени пуска может быть вызвано различными факторами (например, не до конца закрытой заслонкой направляющего аппарата дымососа, высокой влажностью угля для мельниц и т.п.), поэтому для определения причины увеличения времени пуска потребуется производить дополнительные операции.

2) В [59, 60] на математических моделях проведены исследования, которые показывают изменение пусковых характеристик АД при наличии оборванных стержней. В частности, показано различие изменения пускового момента АД и амплитуды пускового тока. При возникновении неисправности значение пускового момента будет ниже, чем в исправном состоянии, также несколько уменьшится и пусковой ток. При этом из-за уменьшения момента происходит и возрастание времени пуска. Однако изменения пусковых характеристик незначительны, в связи с чем их тяжело использовать для оценки технического состояния.

3) В [36, 37] предлагается выявлять наличие оборванных стержней путем сравнения амплитуд сигналов за каждый период после затухания апериодической составляющей. Обрыв стержня двигателя приведет к пульсациям пускового сигнала, в связи с этим будет возникать разница максимумов амплитуд соседних периодов. Однако применение данного метода возможно лишь при достаточной продолжительности времени пуска. Кроме того, как отмечают сами авторы, метод недостаточно чувствителен и не позволяет выявлять один оборванный стержень для АД, число стержней ОР которых превышает 80.

4) В [43] предлагается способ контроля технического состояния двигателя по сигналу тока статора в процессе пуска. Метод заключается в обнаружении в спектре АД при пуске характерных гармоник. Состояние двигателя предлагается оценивать по амплитуде сигнала на конкретной частоте на начальном этапе пуска (при изменении скольжения от 1 до 0,5). В работе показано, что амплитуда сигнала на этой частоте увеличивается в несколько раз при возникновении обрыва стержня. Однако все исследования проведены только на одном маломощном АД и его математической модели, не отмечается, возможно ли проведение контроля на двигателях иных типов. Кроме того, в работе не представлена методика проведения контроля для различных видов АД.

5) В [88] предлагается похожий способ. В работе предлагается выделять из сигнала пускового тока статора гармоническую составляющую с частотой, которая определяется по выражению $f_c \cdot (1 - 2s)$. В работе доказано, что

максимальная разница амплитуды этой гармоники для исправного и поврежденного двигателей будет не в установившемся режиме, а в определенный момент при пуске АД, а именно при скольжении, близком к 0,4. При этом амплитуда этой гармоники при наличии 3 оборванных стержней может быть во много раз выше, чем для АД в исправном состоянии. Однако в работе исследования проведены на низковольтном АД мощностью 1,1 кВт с малым количеством стержней ОР (28). Кроме того, применять метод затруднительно на практике из-за сложности применяемых для обработки сигналов методов и необходимости проработки этих методов для каждого конкретного АД.

6) В [89] предлагается использовать совокупность сигналов тока статора и напряжения при пуске для контроля наличия обрывов стержней. Показано, что при повреждении ОР изменение мощности сигнала будет существенно отличаться от этой зависимости для исправного АД. Так же введен критерий λ , который может определяться по выражению (1.4), по которому можно успешно выявлять неисправности как при пуске, так и в установившемся режиме.

$$\lambda = \frac{(UI)^2}{P^2} - 1, \quad (1.4)$$

где U , I , P – мгновенные значения фазных токов, напряжений и активной мощности.

Однако данные результаты приведены только для экспериментов на математической модели АД. При этом даже на математической модели разница между значениями выведенного критерия невелика. Поэтому проведение контроля на реальных АД в пусковых режимах при наличии эксцентриситета и вибрации затруднительно и может привести к ошибочным выявлениям обрывов ОР.

7) В [121] приводится метод обнаружения оборванных стержней ОР АД с частотным приводом при пуске по току статора. Метод основан на оценке величины плотности энергии гармоник, частоты которых определяются по выражению $f_c \cdot (1 \pm 2s)$, в процессе их пуска. Однако описанный в работе метод подходит только для АД с частотным приводом, спектры которых отличаются от

АД, работающих на электростанциях с тяжелыми пусками. Кроме того, возрастание амплитуды гармоники на верхней боковой частоте может быть вызвана и иными причинами, не связанными с повреждениями ОР.

1.3.4. Методы обработки диагностических сигналов

В большинстве случаев любой из диагностических сигналов не может указать на наличие или отсутствие неисправности без его обработки. В зависимости от того, что именно используется исследователями в качестве диагностических признаков, в каком режиме осуществляется регистрация сигнала, требуется ли извлечение каких-либо характерных особенностей сигнала, методы обработки могут существенно различаться. Поэтому выбор подходящего метода обработки сигналов является важной задачей и требует проведения исследований. Особенно важно выбрать подходящий метод обработки при использовании для выявления обрывов стержней ОР методов спектрального анализа.

Рассмотрим основные методы обработки сигналов, которые используются исследователями для обнаружения диагностических признаков.

1) Статистические методы. Методы, основанные на статистических параметрах сигнала, таких как минимальное значение сигнала, максимальное значение, среднее значение, среднеквадратичное отклонение и т.д., довольно редко применяются при контроле технического состояния АД. Тем не менее, ряд авторов отмечает возможность использования подобных параметров для обнаружения неисправностей АД [108].

2) Преобразование Гильберта. Преобразование Гильберта является эффективным инструментом при анализе сигналов АД. Благодаря преобразованию Гильберта можно не только увеличить амплитуды гармонических составляющих, но и осуществлять фильтрацию мешающих гармоник. При выявлении обрывов стержней многие авторы используют данный вид обработки для определения формы огибающей сигнала, которая и

используется в дальнейшем для контроля технического состояния электродвигателя [63]. При этом многие авторы дополняют этот метод методами спектрального анализа, поскольку анализ спектра огибающей тока статора более эффективен, чем оценка формы полученного сигнала [33, 45, 55, 64, 88, 109, 122].

3) Быстрое преобразование Фурье (БПФ). Методы обработки сигналов, основанные на использовании БПФ, в настоящее время являются наиболее распространенными при спектральном анализе сигналов АД. С помощью этого метода можно из исходного сигнала получить его частотный спектр. При этом в большинстве случаев авторов интересуют не только частоты, но и амплитуды гармонических составляющих сигнала. Поэтому этот метод активно применяется при обработке сигналов внутреннего магнитного поля [20], вибрации [27, 30, 81, 85], тока статора [17, 23, 27, 35, 39, 45, 50, 51, 57, 62, 64, 67, 68, 70-73, 76, 79, 81, 85, 91, 109, 122, 124] и ВМП [13, 30, 93-95, 97, 100-102, 104, 110].

Тем не менее, у БПФ имеются серьезные недостатки. Во-первых, БПФ не может быть использовано для обработки нестационарных сигналов. Поэтому его применение ограничено лишь сигналами, гармонический состав которых не изменяется с течением времени. Учитывая, что нагрузка двигателей в процессе работы может изменяться, требуется довольно малое время записи сигнала для корректной работы.

Во-вторых, гармоники, характеризующие наличие неисправностей АД, имеют низкие амплитуды. При этом частоты этих гармоник часто близки друг к другу, а также к частоте сети (50 Гц). Поэтому чувствительность используемого метода обработки должна быть очень высока. При использовании БПФ приходится принимать во внимание эффект растекания спектра. Точность определения частоты с помощью этого метода определяется шагом по частоте, который, в свою очередь, определяется временем записи сигнала. При малом времени записи сигнала в случае неточного определения частоты вместо одной гармонической составляющей в спектре будет целый ряд гармонических составляющих, причем амплитуда определяемой гармоники будет значительно ниже, чем в действительности. Если неточно определить фундаментальную

частоту, то из-за эффекта растекания спектра определить наличие в спектре гармоник, характеризующих повреждения ОР, становится практически невозможно. Поэтому многие авторы пытаются использовать различные методы для повышения точности определения гармоник в спектре с помощью БПФ.

Можно выделить 2 основных направления:

А) Использование методик, позволяющих подобрать необходимый шаг по частоте для точного определения частоты и амплитуды гармоники. В случае подбора шага по частоте для нескольких гармоник он подбирается индивидуально для каждой гармонической составляющей. В качестве примера, в [98] используется метод, названный методом автокоррекции времени записи сигнала, который в совокупности с удалением из сигнала основной гармонической составляющей позволяет с высокой точностью определить частоту и амплитуду любой гармоники сигнала даже при малом времени записи сигнала.

Б) Использование оконных функций. Умножение сигнала на оконную функцию и применение к полученному сигналу БПФ приводит к тому, что эффект растекания спектра сигнала проявляется очень слабо. Также значительно точнее определяется и амплитуда гармоники. В связи с этим многие авторы используют этот метод в установленном режиме для увеличения точности определения амплитуд гармонических составляющих [25, 41, 42, 78, 123]. Однако точность определения частоты гармоники при помощи оконных функций не увеличивается.

4) Оконное преобразование Фурье (ОПФ). Как было отмечено ранее, основным недостатком БПФ является то, что этот метод обработки сигнала не может быть использован для анализа сигналов, гармонический состав которых изменяется с течением времени. В связи с этим для анализа нестационарных сигналов используются иные методы обработки. Наиболее простым из них можно считать ОПФ. Его использование позволяет получить не частотный спектр, а частотно-временной спектр (ЧВС) сигнала, то есть оценивать амплитуды и частоты гармоник в различные моменты времени.

Принцип действия ОПФ заключается в том, что весь исследуемый сигнал разбивается на промежутки равной длины, на каждом из которых осуществляется

построение спектра. Поскольку сигнал разделяется на интервалы очень малой продолжительности, то для уменьшения растекания спектра используется наложение оконной функции на каждом интервале.

Такой метод обработки сигналов довольно редко применяется для контроля технического состояния АД, однако даже в современных работах некоторые авторы используют его для построения спектров сигналов АД [57, 120].

5) Вейвлет-преобразование. В настоящее время вейвлет-преобразование является одним из самых эффективных методов обработки сигналов. В отличие от ОПФ, основным недостатком которого является то, что сигнал разбивается на участки одной продолжительности, в случае вейвлет-преобразования сигнал подразделяется на участки разной длины. При этом на разных участках у сигнала будет различное разрешение по частоте и по времени. Так как известно, что соотношения между разрешениями по частоте и по времени может быть описано в виде выражения (1.5) [111], то на некоторых участках у сигнала может неточно определяться частота, но при точном определении изменения гармоник во времени, а на других частоты будут определены значительно точнее, но с низкой точностью определения их во времени. Другая возможность применения вейвлет-преобразования заключается в возможности извлечения из сигнала отдельных гармонических составляющих.

$$\Delta f \cdot \Delta T \geq 1, \quad (1.5)$$

где Δf – разрешение по частоте, (Гц);

ΔT – разрешение по времени, (с).

Поэтому, в отличие от ОПФ, вейвлет-преобразование используется исследователями не только при анализе переходных режимов [32, 43, 88, 104, 110], но и для анализа сигналов в установившихся режимах работы для выделения в спектре сигнала отдельных гармоник [40, 44, 55, 56, 61, 69]. Однако вейвлет-преобразование является очень сложным инструментом для обработки сигналов и требует проведения длительных исследований для корректного подбора подходящих вейвлетов для каждого конкретного АД.

1.3.5. Методы оценки технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей по результатам контроля

После выбора метода исследования и соответствующего метода обработки сигнала необходимо определить, находится двигатель в исправном или поврежденном состоянии. Часто это представляет серьезные затруднения, так как для различных АД амплитуды диагностических сигналов, общее количество стержней, число пар полюсов и другие параметры существенно различаются. Для методов спектрального анализа для разных типов АД амплитуды характерных гармоник в исправном и неисправном состоянии также будут существенно различаться. В связи с этим необходимо рассмотреть, какие методы могут быть использованы для определения технического состояния ОР АД по результатам контроля.

1) Визуальная оценка. Этот способ является самым простым при оценке состояния АД. При использовании отдельных методов контроля технического состояния и обработки сигналов наличие повреждения может быть определено не по значению некоторого параметра, а визуально. В качестве примера подобного метода контроля может выступать метод вектора Парка, возникновение высокоамплитудных гармоник, появление заметных пульсаций сигнала, разница амплитуд сигнала в различных точках измерения и т.д.

2) Задание пороговых значений. Этот метод определения технического состояния электродвигателей является одним из самых простых в реализации. При использовании подобного способа техническое состояние АД определяется по численному значению диагностического параметра. Если этот параметр ниже определенного порогового значения, двигатель считается исправным, если же оно превышает границу, то имеется повреждение. Чаще всего значение параметра определяется на основе опыта эксплуатации АД либо на базе большого количества проведенных экспериментов.

Подобные значения предлагаются в большом количестве публикаций [4, 13, 16, 22, 23, 27, 28, 29, 33, 35, 51, 56, 63, 67, 69, 70, 76, 78, 88, 101, 114], в том числе

и в межгосударственных стандартах по контролю АД [91, 92]. Поскольку значения амплитуд сигналов может существенно различаться для различных двигателей, эти значения чаще всего приводятся в дБ, так как разности между амплитудами гармоник приблизительно одинаковы для большинства АД.

Также нужно отметить, что часто вместо количественной оценки пороговых значений на практике производится анализ тренда изменения диагностических параметров, то есть сигнал о возможном наличии неисправности подается при резком увеличении или уменьшении исследуемого параметра.

3) Методы на основе построения математических моделей асинхронных двигателей. Принципиально этот метод является очень близким к предыдущему, однако в этом случае пороговое значение может быть определено не на реальных АД, а на их математических моделях. Преимуществом подобного подхода является то, что на математических моделях можно произвести любые эксперименты, в то время как на реальных двигателях это невозможно. Поэтому, проделав опыты с обрывом стержней ОР на корректной математической модели, можно оценить пороговые значения и для реальных машин, что и предлагается в ряде работ [73, 87, 98].

В настоящее время наибольшее распространение получили модели АД на базе метода конечных элементов, реализованные в программном комплексе Ansys или других подобных продуктах. При этом авторами показана возможность моделирования как двумерной модели [22, 43, 53, 59, 60, 68, 94-96, 103, 106, 112, 114-116, 123], так и трехмерной [47, 65], что позволяет измерять у него любые из электрических сигналов АД.

4) Определение технического состояния на основе нечеткой логики. Нечеткая логика является эффективным инструментом для определения технического состояния электродвигателей в том случае, когда необходима оценка учета нескольких факторов. Некоторые авторы отмечают возможность применения нечеткой логики при спектральном анализе сигналов АД, поскольку в этом методе сигнала правильнее оценивать не амплитуду какой-либо одной гармоники, характеризующей наличие неисправности, а нескольких

гармонических составляющих [40, 64, 72]. Также этот метод может быть использован и для выявления других неисправностей, например, выявления повреждений изоляции [117].

5) Нейронные сети. В настоящее время нейронные сети применяются очень часто во многих областях науки и техники. Принцип действия нейронной сети заключается в том, что при подаче на нее необходимого количества исходных данных она способна оценить, в каком состоянии находится двигатель. Оценка производится путем предварительного обучения сети. Суть обучения заключается в том, что для сети задаются случаи, в которых достоверно известно, исправен контролируемый объект или поврежден, а также степень этого повреждения. При этом производится настройка весовых коэффициентов внутри самой нейронной сети. В результате при достаточно большом количестве случаев, по которым обучается нейронная сеть, весовые коэффициенты определяются достаточно точно, и сеть будет способна с малой вероятностью ошибки определять состояния реальных АД.

Для контроля АД нейронные сети могут применяться как для комплексной оценки технического состояния двигателя по набору параметров различных методов контроля, так и для определения отдельных дефектов [26, 39, 46, 55, 62, 83, 84, 118, 122]. В качестве инструмента для контроля наличия оборванных стержней ОР нейронные сети применяются для оценки состояния по амплитудам всех характеристических гармоник.

6) Экспертные системы. Создание экспертной системы позволяет существенно упростить работу персонала. Задача экспертной системы – давать рекомендации по дальнейшей эксплуатации оборудования на основе его технического состояния. В качестве параметров, используемых при выдаче рекомендаций, могут быть введены любые параметры АД, в том числе и амплитуды гармоник для определения технического состояния оборудования. Поэтому некоторые авторы уделяют внимание созданию экспертных систем при контроле наличия оборванных стержней ОР [64, 82, 110]. Однако вынесение

решений экспертами основывается на одном из описанных ранее методов принятия решений.

1.4. Выбор и обоснование методов и задач дальнейших исследований

Подводя итог обзору существующих методов контроля и оценки технического состояния ОР АД, можно представить их в виде блок-схемы, показанной на рис. 1.10.

По результатам проведенного анализа были выбраны методы, которые могли бы быть эффективны для контроля технического состояния высоковольтных АД системы СН электростанций с тяжелыми условиями пуска и могли бы быть разработаны или усовершенствованы для более эффективной работы.

В ходе анализа существующих методов показано, что наиболее эффективными в настоящее время являются методы контроля на основе спектрального анализа, суть которых заключается в выявлении в спектре диагностического сигнала гармоник от ФОР. Для высоковольтных АД, являющихся приводами механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта на электростанциях, было принято решение использовать для контроля технического состояния ОР пусковые сигналы. Это связано с тем, что проведение контроля в установившемся режиме накладывает ряд ограничений к области применения методов, что неприемлемо для рассматриваемых АД, а именно:

1) Невозможен контроль АД механизмов, нагрузка которых резко изменяется с течением времени. Примером таких механизмов могут служить дробилки и мельницы на тепловых пылеугольных электрических станциях.

2) Невозможно произвести контроль механизмов, нагрузка которых очень мала и близка к холостому ходу. Как было указано в [98], при малых нагрузках АД амплитуды гармоник от ФОР слишком малы, поэтому их очень сложно выявить в частотном спектре магнитного поля.

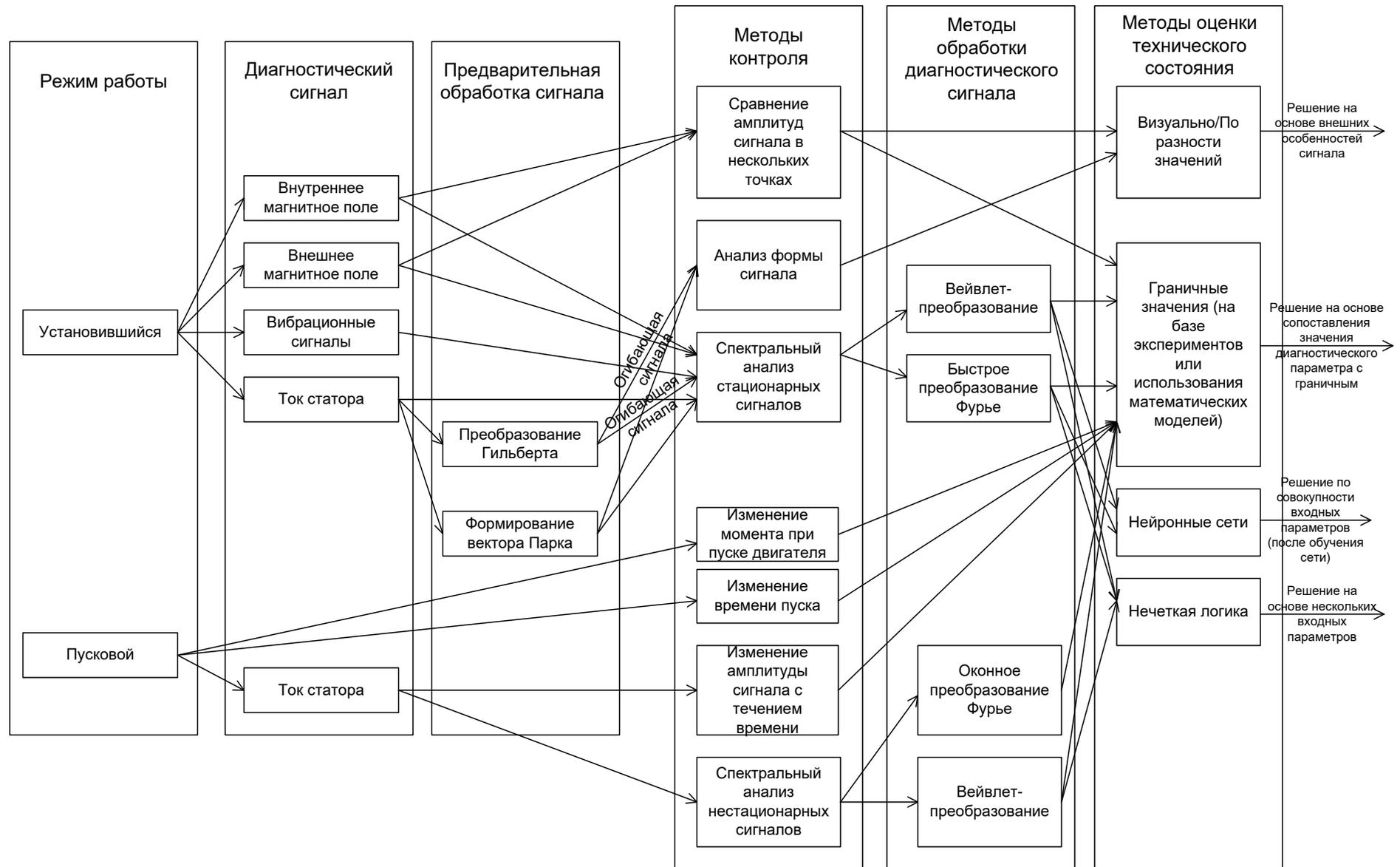


Рис. 1.10. Методы контроля технического состояния АД

3) Для АД с двойной беличьей клеткой затруднено выявление обрывов стержней пусковой обмотки, так как в установившемся режиме большая часть тока протекает через рабочую обмотку. Однако чаще всего рвется именно пусковая обмотка, что может привести к тому, что неисправность не будет своевременно обнаружена.

Поэтому главным преимуществом оценки технического состояния двигателя в пусковых режимах заключается в возможности оценивать состояние АД любого механизма СН независимо от нагрузки в установившемся режиме работы, а также возможность контроля АД с двойной беличьей клеткой. Другим преимуществом регистрации пускового сигнала ВМП является то, что при пуске токи АД максимальны, в результате чего при пуске гармоники будут наиболее отчетливо проявляться в спектрах исследуемых сигналов.

В качестве диагностических сигналов для дальнейшей работы выделены сигналы радиальной составляющей индукции ВМП (которую далее будем называть ВМП) и тока статора. Выбор обусловлен тем, что оба выбранных сигнала удобны для регистрации и содержат выраженные гармонические составляющие, характеризующие наличие оборванных стержней ОР. Сигнал радиальной составляющей ВМП и тока статора возможно измерять для АД любой конструкции, мощности, с любым количеством пар полюсов и пазов ротора и статора, с любым типом подключенного механизма СН. Ограничением применения сигнала ВМП является то, что у некоторых высоковольтных АД на электростанциях корпус выполняется из магнитных материалов, в связи с чем амплитуды искомым гармонических составляющих будут очень малы, поэтому для их регистрации потребуются очень чувствительные датчики. Недостатком использования в качестве диагностического сигнала тока статора является необходимость доступа к токовым цепям, что возможно не для всех высоковольтных АД на электростанциях.

Как уже было написано ранее, обработка пусковых сигналов не может быть осуществлена путем традиционного БПФ. Поэтому в качестве инструмента для обработки сигналов могут быть использованы либо ОПФ, либо вейвлет-

преобразование. Поскольку амплитуды искомым сигналов при пуске двигателя будут достаточно велики, то первоначально необходимо оценить возможность применения ОПФ, а в случае невозможности его применения – вейвлет-преобразования.

Наконец, необходимо определить диагностические признаки и параметры наличия неисправности. Для оценки порогового значения диагностических параметров удобно использовать математическую модель в программном комплексе Ansys, после чего использовать полученные результаты при оценке технического состояния реальных АД, а также производить анализ тренда амплитуд искомым гармонических составляющих. В зависимости от того, что может служить диагностическим признаком неисправности, будет определено, необходимы ли более сложные методы оценки технического состояния или нет.

Выводы по главе 1

1. Хотя обрывы стержней ОР и не являются самой частой причиной отказов АД, однако во многих работах уделяется большое внимание их своевременному выявлению. Особенно актуальна проблема повреждения ОР для мощных высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска, которые применяются на электрических станциях в системе СН, поскольку для таких двигателей доля отказов от обрывов стержней значительно выше, чем для иных АД.

2. Можно выделить три составляющие экономического ущерба для электрических станций, возникающего при обрыве стержней ОР высоковольтных АД. Во-первых, необходимость ремонта или замены АД вследствие отказа. Во-вторых, появление ущерба вследствие полного или частичного отключения блока электростанции вследствие отказа АД. В-третьих, при работе с оборванными стержнями ОР возрастает потребление АД мощности и электрической энергии. Расчет экономического ущерба показал, что затраты электростанции из-за

повреждения могут быть довольно существенными, что подтверждает актуальность рассматриваемой темы.

3. На текущий момент в публикациях российских и зарубежных авторов большое внимание уделено контролю технического состояния двигателей в установившемся режиме их работы, эффективном для контроля многих АД. Однако из-за особенностей работы АД системы СН электростанций более эффективными являются методы контроля в пусковых режимах, в связи с чем для обеспечения надежной работы АД СН с тяжелыми условиями пуска необходимо большее внимание уделять разработке именно методов контроля при пуске.

4. В настоящее время перспективными направлениями контроля являются спектральный анализ радиальной составляющей ВМП и тока статора. При этом в имеющихся публикациях авторы практически не уделяют внимания вопросам проведения контроля в пусковом режиме работы АД.

5. Для обработки сигналов при пуске АД могут быть использованы методы ОПФ или вейвлет-преобразования на основе использования современных программно-вычислительных комплексов. Определение пороговых значений наличия неисправности может быть основано на построении моделей АД с помощью метода конечных элементов.

Материалы первой главы опубликованы в работах [130, 137, 138, 148, 150].

Постановка задач исследования

Проведенный анализ опубликованных данных позволяет сформулировать задачи исследования, решение которых необходимо для достижения цели диссертации:

1. Разработка алгоритма для анализа ЧВС сигналов высоковольтных АД электростанций при пуске на базе ОПФ и его апробация на тестовом сигнале, близком к пусковым сигналам высоковольтных АД с длительным пуском;

2. Определение присутствующих во ВМП и токе статора при пуске диагностических признаков и параметров повреждения ОР высоковольтных АД

системы СН электростанций за счет разработки в программном комплексе Ansys на основе метода конечных элементов моделей данных двигателей и исследования на основе разработанных моделей влияния обрывов стержней ОР на ЧВС сигналов тока статора и ВМП;

3. Разработка методики контроля технического состояния ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска на основе спектрального анализа пусковых сигналов тока статора и ВМП и проверка работоспособности предлагаемой методики на экспериментальном стенде на низковольтном АД при подаче пониженного напряжения для искусственного затягивания пуска и в ходе натуральных экспериментов на реальных высоковольтных АД механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления системы СН электростанций.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА СТАТОРА ПРИ ПУСКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЦЕЛЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ

2.1. Постановка задачи

Поскольку в существующих в настоящее время работах в области диагностики АД не проведены исследования пусковых сигналов ВМП и не произведена оценка влияния на этот сигнал обрывов стержней короткозамкнутой ОР, то первоначальной задачей исследования является определение возможных диагностических признаков и параметров наличия оборванных стержней, а также разработка методов их обнаружения в диагностическом сигнале (ВМП). Также для нахождения диагностического признака и параметра наличия оборванных стержней ОР при пуске по току статора (так как в рассмотренных источниках они несколько различаются) необходимо проанализировать и изменение гармонического состава тока статора в процессе пуска АД.

Так как при пуске двигателя изменяется скорость его вращения, а также и его скольжение, то гармонический состав высоковольтных АД СН будет существенно изменяться в различные моменты времени пуска. Известно, что при обрыве стержней ОР в спектре должны проявляться характерные гармонические составляющие, амплитуды которых в пусковом режиме должны превышать амплитуды в установившемся режиме. Кроме того, необходимо оценить возможность влияния на эти гармоники иных эксплуатационных факторов (особенно динамического эксцентриситета (ДЭ), который в установившемся режиме работы может существенно исказить спектр АД [98]), характерных для АД СН. Поэтому необходимо определить взаимное расположение гармоник и

выделить те из них, по которым было бы удобно производить контроль технического состояния ОР АД.

Как было отмечено в первой главе, применение методов на основе БПФ не позволяет корректно строить спектры сигналов, амплитуды или частоты которых изменяются с течением времени. Поэтому следующей задачей является разработка алгоритма, в котором было бы возможным производить обработку сигналов АД в нестационарных режимах. При этом следует учесть, что время пуска рассматриваемых в диссертационной работе высоковольтных АД СН достаточно велико (превышает 3 сек), что также необходимо учесть при разработке алгоритма.

Таким образом, в этой главе можно сформулировать 3 основные задачи:

- 1) Оценка поведения и взаимного расположения гармоник от ФОР в процессе пуска АД в сигналах ВМП и тока статора;
- 2) Определение удобных диагностических признаков и параметров возникновения дефекта в ходе пуска АД при учете возможного влияния эксплуатационных факторов;
- 3) Разработка и проверка корректности алгоритма, позволяющего производить обработку пусковых сигналов высоковольтных АД с длительным пуском.

2.2. Анализ изменения частот гармонических составляющих, характеризующих наличие оборванных стержней, при пуске асинхронного двигателя

Как было отмечено в главе 1, обрыв стержня ОР АД приводит к появлению в спектре ВМП гармонических составляющих от ФОР. В соответствии с [20], частоты этих гармоник могут быть определены по следующим выражениям:

$$f_{\Phi OP}^{(v-)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v - s \right), \quad (2.1)$$

$$f_{\Phi OP}^{(v+)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v + s \right), \quad (2.2)$$

где $v-$ – порядок гармоники v -го порядка на нижней боковой частоте;

$v+$ – порядок гармоники v -го порядка на верхней боковой частоте;

$f_{\Phi OP}^{(v-)}$ – нижняя боковая частота гармоники от ФОР v -го порядка, Гц;

$f_{\Phi OP}^{(v+)}$ – верхняя боковая частота гармоники от ФОР v -го порядка, Гц.

В процессе пуска АД частоты этих гармонических составляющих будут изменяться при изменении скорости вращения и скольжения двигателя. Остальные параметры выражений (2.1) и (2.2) в ходе пуска не изменяются либо изменяются незначительно. Кроме того, любая гармоника рассматриваемого сигнала является четной периодической функцией, поэтому выражения (2.1) и (2.2) удобнее записать в следующем виде:

$$f_{\Phi OP}^{(v-)}(t) = \left| f_c \cdot \left(\frac{1-s(t)}{p} \cdot v - s(t) \right) \right|, \quad (2.3)$$

$$f_{\Phi OP}^{(v+)}(t) = \left| f_c \cdot \left(\frac{1-s(t)}{p} \cdot v + s(t) \right) \right|, \quad (2.4)$$

где t – момент времени в процессе пуска АД.

Так как в спектре ВМП наиболее отчетливо проявляются гармоники от ФОР с низкими частотами (обычно первых пяти порядков), то для анализа поведения гармонических составляющих при пуске АД были рассчитаны и построены зависимости изменения верхних (по формуле (2.4)) и нижних (по формуле (2.3)) боковых частот гармоник от ФОР первых 7 порядков. В качестве примера на рис. 2.1 и 2.2 приведены графики изменения частот гармоник от ФОР для двигателей с 3 парами полюсов и двигателей с 4 парами полюсов соответственно при изменении скольжения двигателя от 0 до 1.

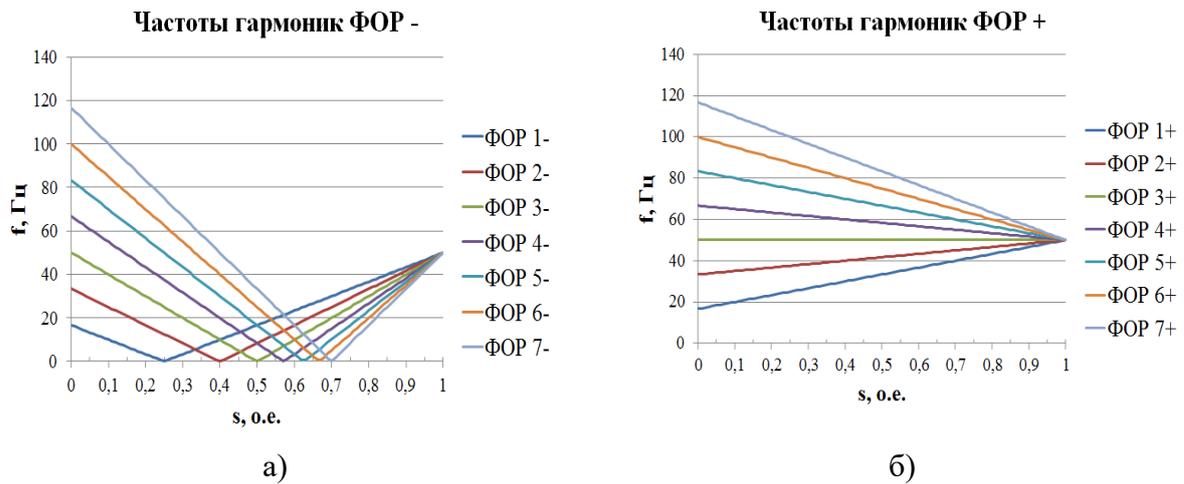


Рис. 2.1. Частоты гармоник от ФОР в спектре ВМП для двигателя с 3 парами полюсов: а) нижние боковые частоты; б) верхние боковые частоты

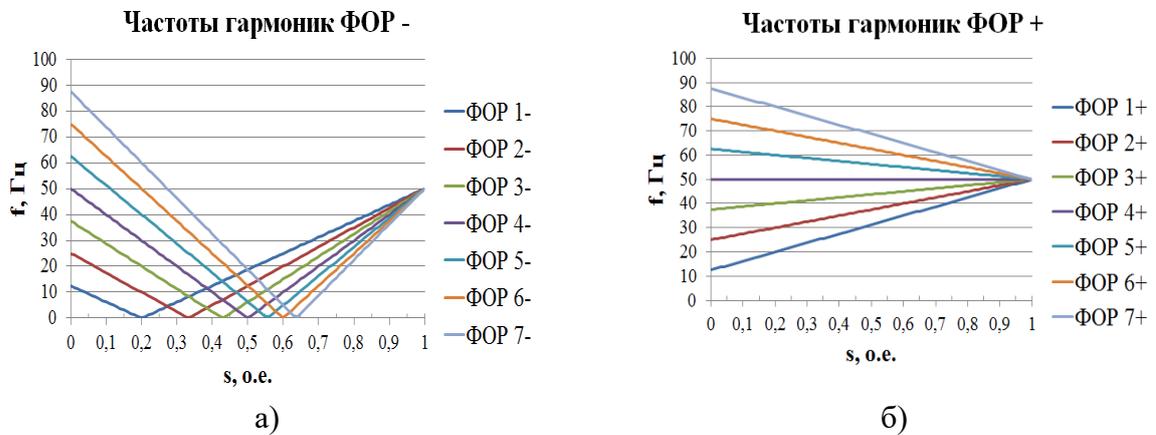


Рис. 2.2. Частоты гармоник от ФОР в спектре ВМП для двигателя с 4 парами полюсов: а) нижние боковые частоты; б) верхние боковые частоты

Проанализируем полученные результаты. Как известно, в начале пускового режима скольжение двигателя равно 1, а в установившемся режиме – близко к 0. Поэтому в начальный момент времени пуска двигателя частоты гармонических составляющих одинаковы и составляют 50 Гц. Также можно отметить, что и в установившемся режиме работы значения нижних и верхних боковых частот практически одинаковы и различаются на величину $2s \cdot f_c$. Однако между моментами начала пуска и установившимся режимом гармоники от ФОР на верхних и нижних боковых частотах ведут себя различно. Верхние боковые частоты гармоник от ФОР (ФОР $\nu+$ на рис. 2.1-2.2) при пуске линейно изменяются от 50 Гц до установившихся значений (которые приблизительно составляют $\nu \cdot \frac{f_c}{p}$) при изменении скольжения от 1 до $s_{уст}$ (значение скольжения в

установившемся режиме работы двигателя). В то же время гармоники от ФОР на нижних боковых частотах сначала линейно уменьшаются до 0, и лишь потом возрастают до установившихся значений. Так как наглядной особенностью гармоник от ФОР на нижних боковых частотах является «отражение» в спектре от оси скольжения, скорости вращения двигателя или времени, то в дальнейшем при изложении будем называть их «отраженными» гармониками. При этом наиболее различимы гармоники станут при малых значениях скольжения, но не достигая установившихся значений, когда разница между частотами гармонических составляющих будет достаточно велика, а значения верхних и нижних частот гармоник от ФОР существенно различаются.

Спектр сигнала тока статора при пуске отличается от спектра ВМП АД. Это связано с тем, что обмотка статора служит фильтром для большинства гармоник от ФОР. В [20] показано, что наиболее отчетливо в спектре тока статора может проявляться гармоника от ФОР, порядок которой совпадает с числом пар полюсов. То есть характерными гармониками при обрыве стержней ОР будут гармонические составляющие с частотами:

$$f_{\text{ФОР}}^{(p-)}(t) = |f_c \cdot (1 - 2 \cdot s(t))|, \quad (2.5)$$

$$f_{\text{ФОР}}^{(p+)}(t) = f_c. \quad (2.6)$$

Так как очевидно, что вторая из указанных гармонических составляющих совпадает с основной гармоникой сигнала тока статора, то ее амплитуда не может служить диагностическим параметром наличия обрыва стержня ОР. Поэтому характерным признаком наличия дефекта является возрастание амплитуды в спектре тока статора гармоники, частота которой определяется по выражению (2.5). На рис. 2.3 изображена зависимость частоты этой гармонической составляющей, определенной по выражению (2.5), от скольжения АД. Очевидно, что искомая гармоника будет «отраженной». Следует отметить, что в отличие от сигнала ВМП, в данном случае значения частот в процессе пуска не будут зависеть от числа пар полюсов.

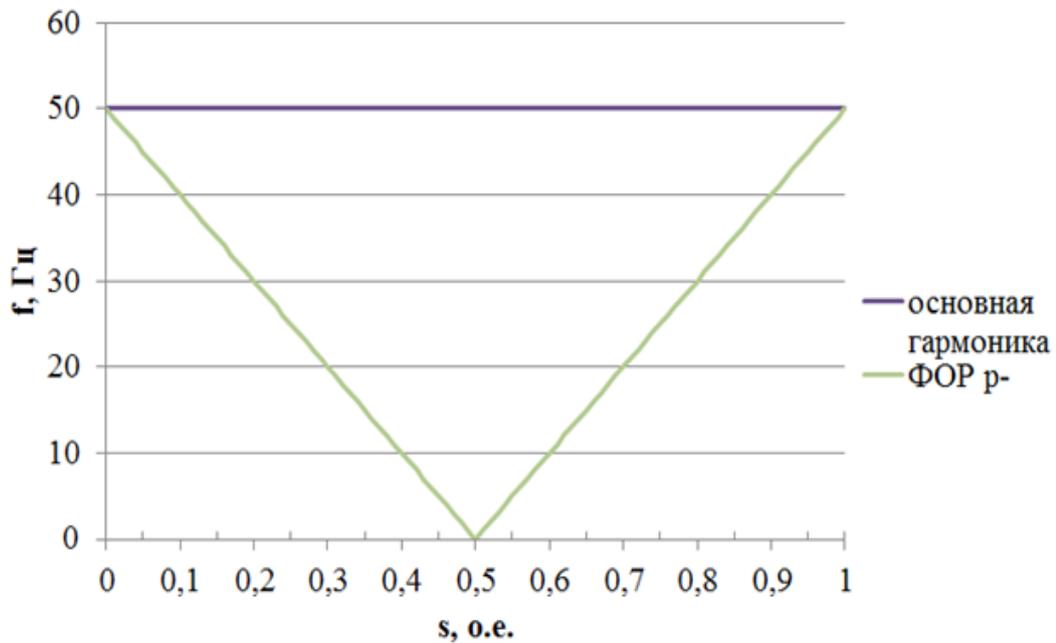


Рис. 2.3. Частота гармоник от ФОР на нижней боковой частоте порядка, совпадающего с числом пар полюсов, в спектре тока статора в процессе пуска

2.3. Оценка возможности влияния эксплуатационных факторов на амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора во внешнем магнитном поле в режиме пуска асинхронного двигателя

В [98] было показано, что различные эксплуатационные факторы могут приводить к изменению спектра сигнала ВМП в установившемся режиме. В частности, было рассмотрено влияние следующих факторов: нагрузка АД, статический и ДЭ, несимметрия питающего напряжения. Рассмотрим возможность влияния этих факторов на амплитуды гармонических составляющих от ФОР в спектре пускового сигнала ВМП.

1) несимметрия питающего напряжения и статический эксцентриситет. Как показано в [98], несимметрия питающего напряжения и статический эксцентриситет почти не влияют на амплитуды гармоник от ФОР во ВМП, поэтому в пусковых режимах влияние этих факторов также не будет проявляться.

2) нагрузка АД. Ранее было отмечено, что малая нагрузка двигателей приводит к тому, что гармоники от ФОР во ВМП в установившемся режиме практически не проявляются. Однако при пуске, когда амплитуда тока очень велика, гармоники будут проявляться независимо от того, какой будет нагрузка после окончания пуска. Поэтому единственным влиянием, которое может оказать нагрузка двигателя, может быть связана лишь с изменением времени пуска агрегата, приводом которого является контролируемый АД.

3) ДЭ. Этот фактор может привести к существенному искажению сигнала гармоник от ФОР в установившемся режиме во ВМП. Это связано с тем, что частоты гармоник ДЭ совпадают с частотами гармонических составляющих от ФОР [98]. В связи с этим необходимо исследовать, может ли ДЭ привести к существенному изменению амплитуд гармоник от ФОР в пусковом режиме.

Известно, что ДЭ приводит к появлению в спектре сигнала гармоник ДЭ. Частоты этих гармоник могут быть определены по выражениям:

$$f_{ГДЭ}^{(v-)}(t) = \left| f_c \cdot \left(1 - \frac{1-s(t)}{p} \cdot v \right) \right|, \quad (2.7)$$

$$f_{ГДЭ}^{(v+)}(t) = \left| f_c \cdot \left(1 + \frac{1-s(t)}{p} \cdot v \right) \right|, \quad (2.8)$$

где $f_{ГДЭ}^{(v-)}$ – нижняя боковая частота гармоники ДЭ v -го порядка, Гц;

$f_{ГДЭ}^{(v+)}$ – верхняя боковая частота гармоники ДЭ v -го порядка, Гц.

Графики изменения верхних и нижних боковых частот гармоник ДЭ первых семи порядков приведены на рис. 2.4 и 2.5 для двигателей с 3 и 4 парами полюсов соответственно. Сравнивая эти рисунки с рис. 2.1 и 2.2, хорошо видно, что частоты гармоник ДЭ и ФОР действительно совпадают при любых значениях скольжения (за исключением гармоник «нулевого» порядка, отсутствующих в спектре), однако различаются порядки этих гармоник. Из рисунков видно, а также математически было выведено соотношение соответствия порядков гармоник от ФОР и ДЭ:

$$v_{ФОР} = v_{ГДЭ} + p, \quad (2.9)$$

где $\nu_{\text{ФОР}}$ – порядок гармоники от ФОР;

$\nu_{\text{ГДЭ}}$ – порядок гармоники ДЭ.

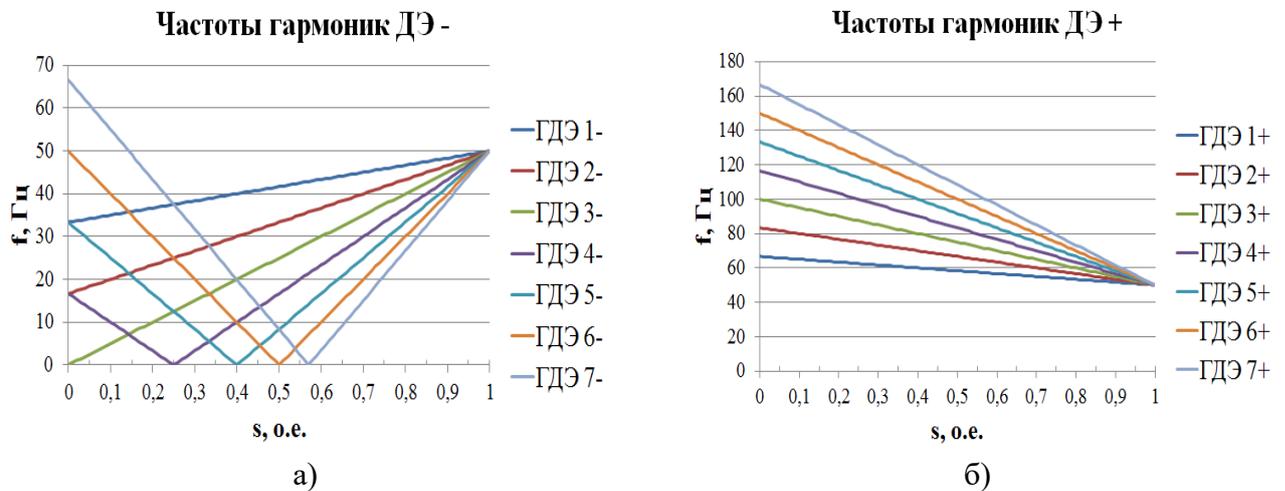


Рис. 2.4. Частоты гармоник ДЭ для двигателя с 3 парами полюсов:
а) нижние боковые частоты; б) верхние боковые частоты

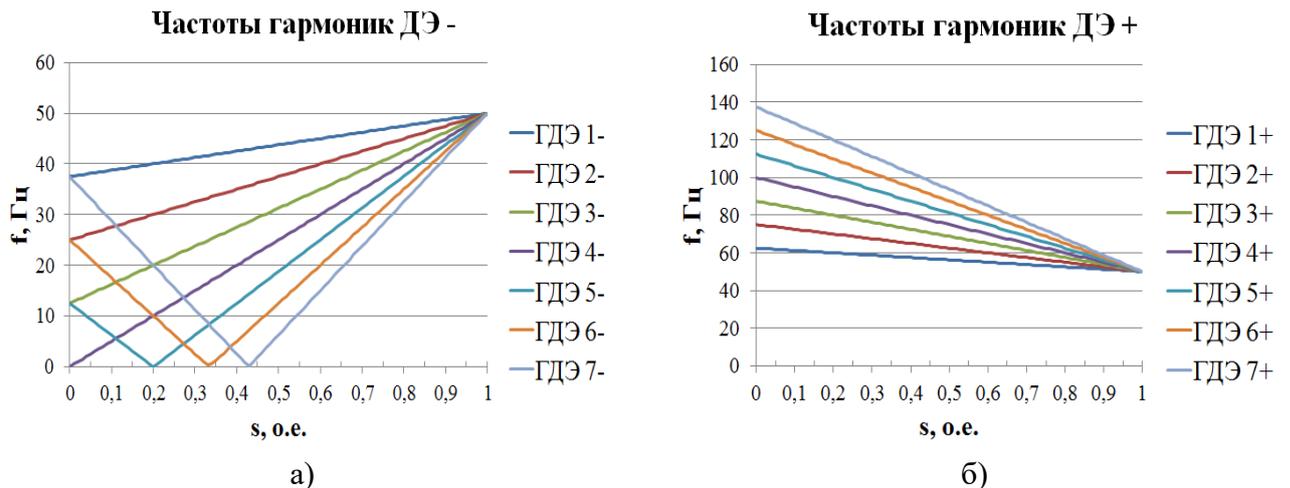


Рис. 2.5. Частоты гармоник ДЭ для двигателя с 4 парами полюсов:
а) нижние боковые частоты; б) верхние боковые частоты

Таким образом, гармоники ДЭ действительно могут оказать существенное влияние на амплитуды гармоник от ФОР, что может привести к ошибочному определению наличия оборванных стержней. Однако, в [23] было показано, что в спектре сигналов АД отчетливо проявляются лишь гармоники ДЭ первых порядков (не более 3). Амплитуды остальных гармоник имеют очень низкие значения и практически не проявляются в спектре. С другой стороны, в [98] показано, что в сигнале ВМП отчетливо проявляются гармоники от ФОР первых

пяти порядков на верхних и нижних боковых частотах, остальные же гармоники проявляются в спектре значительно слабее. Поэтому для оценки возможности определения частот гармоник от ФОР в спектре ВМП на рис. 2.6 сопоставлены значения частот гармоник от ФОР с высокими амплитудами (первых 5 порядков) со значениями частот ДЭ первых 3 порядков (на примере двигателя с 4 парами полюсов).

Из полученных графиков видно, что верхние боковые частоты гармоник от ФОР совпадают с нижними боковыми частотами гармоник ДЭ первых порядков с высокими амплитудами, а также с основной гармоникой сигнала (с частотой 50 Гц). С другой стороны, гармонические составляющие на нижних боковых частотах, которые «отражаются» от оси скольжения на рис. 2.6б, имеются в спектре только при возникновении обрывов стержней ротора и не будут проявляться в спектре при наличии ДЭ. В связи с этим сделан вывод, что резкое возрастание амплитуд отраженных гармонических составляющих от ФОР позволяет судить о наличии повреждения двигателя. Также можно использовать при проведении контроля и гармонические составляющие от ФОР на верхних боковых частотах более высоких порядков, однако их амплитуды в сигнале ВМП будут очень малы, особенно для рассматриваемых в ходе работы высоковольтных мощных АД, являющихся приводами механизмов СН. Возможность же использования для контроля гармоник от ФОР на верхних боковых частотах низких порядков должна быть обоснована при исследовании влияния ДЭ на амплитуды гармоник от ФОР.

В спектре тока статора искомой является гармоника от ФОР, порядок которой совпадает с числом пар полюсов на нижней боковой частоте, поэтому влияние ДЭ на амплитуду этой гармоники не может быть значительным. Кроме того, амплитуды гармоник ДЭ в спектре тока статора значительно ниже, чем в спектре ВМП. В связи с этим нет необходимости производить анализ влияния ДЭ на спектр тока статора.

Так как гармонический состав двигателя в процессе пуска изменяется, то следующей задачей является разработка алгоритмов, позволяющих анализировать ЧВС АД.

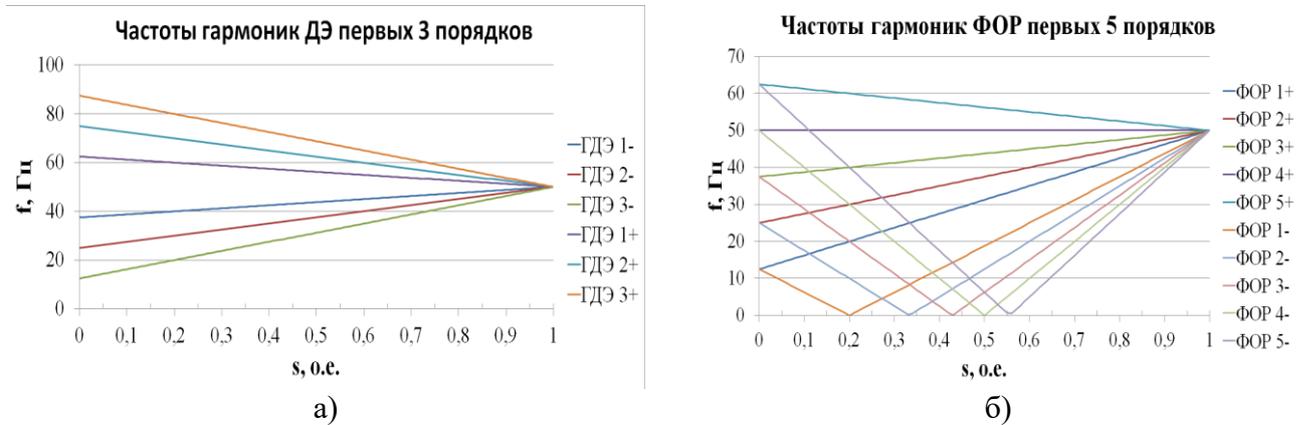


Рис. 2.6. Частоты гармоник ДЭ (а) и ФОР (б) с высокими амплитудами для двигателя с 4 парами полюсов

2.4. Исследование возможности применения оконного преобразования Фурье для построения частотно-временного спектра асинхронного двигателя при пуске

Традиционно обработка сигналов в установившихся режимах осуществляется на основе БПФ. Также в [98] было показано, что можно усовершенствовать метод БПФ с помощью применения фильтрации основной гармонической составляющей и использования метода автокоррекции времени записи сигнала. Кроме того, некоторые авторы предлагали применять специальные оконные функции для более точного определения амплитуд [25, 41, 78, 123]. Однако все эти методы могут быть применены лишь к стационарным сигналам. В случае изменения нагрузки БПФ не способно обеспечивать возможность корректного построения спектра. В этом случае требуется применять иные методы обработки сигнала.

Для решения поставленной задачи регистрации гармоник в пусковых режимах необходимо получать не частотный, а ЧВС. Для подобных целей традиционно используется кратковременное преобразование Фурье (Short Time

Fourier Transform в англоязычной литературе [7], в российских источниках [119] часто называется ОПФ) либо вейвлет-преобразование. Вейвлет-преобразование является более сложным методом обработки сигнала, однако он наиболее эффективен в случаях, когда на разных участках сигнала необходимо получать различные разрешения по частоте и по времени. Поскольку невозможно одновременно получить высокое разрешение и по частоте, и по времени [111], то с помощью вейвлет-преобразования выбираются участки сигнала, где требуется высокое разрешение по времени и не требуется высокого разрешения по частоте и наоборот. В данном случае, как видно из рис. 2.1 и 2.2, при приближении к установившемуся режиму расстояние между соседними гармониками лишь увеличивается и по частоте, и по времени, поэтому изменения разрешения в процессе пуска не требуется. Поэтому для дальнейшей работы выбрано ОПФ.

Принцип ОПФ заключается в том, что весь зарегистрированный сигнал разбивается на участки (интервалы) небольшой длины ΔT , на каждом из которых производится преобразование Фурье. Для получения спектра достаточной точности каждый новый интервал начинается не после окончания предыдущего, а значительно ранее, то есть осуществляется перекрытие интервалов разделения.

При таком разбиении на каждом участке (продолжительность которых значительно меньше времени пуска) определять спектр по методу БПФ становится невозможно из-за влияния эффекта растекания спектра. Поэтому на каждом из интервалов сигнал в этом случае умножается на оконную функцию. Общий вид большинства оконных функций имеет следующий вид:

$$w(n) = a_0 + a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) + \dots, \quad (2.10)$$

где w – оконная функция;

n – номер точки (сэмпла) сигнала;

$a_0, a_1, a_2 \dots$ – коэффициенты оконной функции;

N – общее количество точек (сэмплов) на интервале разбиения сигнала.

Это выполняется для изменения формы сигнала, что приводит к изменению и его спектра, а именно, к значительному уменьшению эффекта растекания

спектра. Следует учесть, что подобное умножение приведет к существенному изменению амплитуд гармонических составляющих по сравнению с реальным сигналом. При этом следует учесть 2 фактора:

1) длину интервала, на котором производится умножение на оконную функцию. Для получения корректного результата после преобразования необходимо учесть длину интервала разбиения и разделить амплитуду на половину длины интервала разбиения.

2) площадь оконной функции (или ее интеграл). Если интеграл прямоугольной оконной функции на интервале от 0 до N , разделенный на N , равен единице и потому никак не влияет на амплитуду сигнала, то интеграл других оконных функций не равняется 1, поэтому это необходимо учесть при определении амплитуд. Другими словами, для корректного определения амплитуды сигнала необходимо разделить его на интеграл оконной функции, разделенный на N , на интервале от 0 до N . Как видно из формулы (2.8), оконная функция состоит из постоянной составляющей (a_0) и нескольких периодических функций. Хорошо известно, что интеграл любой периодической функции на интервале от 0 до 2π равен нулю, поэтому интеграл будет равен постоянной составляющей периодической функции.

Таким образом, действительные амплитуды сигнала при ОПФ могут быть определены по выражению:

$$A = \frac{2 \cdot A_0}{a_0 \cdot N}, \quad (2.11)$$

где A – действительная амплитуда гармоники;

A_0 – полученная амплитуда при построении спектра.

Подобный пересчет амплитуд гармонических составляющих позволяет построить спектр сигнала A_D в относительных единицах.

Рассмотрим более подробно недостатки и преимущества различных окон при анализе сигналов.

В настоящее время при обработке сигналов используются разнообразные оконные функции, позволяющие при обработке сигнала получить спектры с

различными разрешениями по частоте и по времени. Традиционно их разделяют на 2 группы: окна высокого разрешения (к которым относятся прямоугольное окно, окно Ханна, окно Хэмминга и т.д.) и окна низкого разрешения (окно Флэттоп, окно Блэкмана-Наталла и т.д.).

Таблица 2.1. Применяемые при анализе сигнала оконные функции

№	Наименование окна	Математическое выражение	Тип окна
1	Прямоугольное окно (БПФ)	$w(n) = 1$	Окно высокого разрешения
2	Окно Ханна	$w(n) = 0,5 - 0,5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$	Окно высокого разрешения
3	Окно Хэмминга	$w(n) = 0,54 - 0,46 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$	Окно высокого разрешения
4	Окно Блэкмана	$w(n) = 0,42 - 0,5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0,08 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right)$	Окно высокого разрешения
5	Окно Блэкмана-Наталла	$w(n) = 0,364 - 0,489 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0,136 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) - 0,011 \cdot \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right)$	Окно низкого разрешения
6	Окно Флэттоп	$w(n) = 1 - 1,93 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 1,29 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) - 0,39 \cdot \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right) + 0,03 \cdot \cos\left(\frac{8\pi n}{N}\right)$	Окно низкого разрешения

Для сравнения этих окон произведена оценка их эффективности при построении спектра идеального сигнала, состоящего только из одной гармонической составляющей с частотой 50 Гц, амплитудой 160. Обработка сигналов производилась при различной продолжительности сигнала, но близкой к 1 сек. Это сделано для того, чтобы произвести сравнение полученной гармоники при максимально возможном эффекте растекания спектра, при менее заметном эффекте растекания спектра и при отсутствии эффекта растекания спектра. Используемые при обработке оконные функции представлены в табл. 2.1. Отображение искомой гармонической составляющей в спектре при применении различных окон при различной длительности сигнала приведено на рис. 2.7-2.9. Для удобства сравнения результаты определения гармоники представлены в табл. 2.2-2.4.

Таблица 2.2. Результаты определения гармонической составляющей с амплитудой 160 о.е. и частотой 50 Гц с помощью различных окон при времени записи сигнала 1 сек

№	Наименование окна	Значение амплитуды	Ширина главного лепестка, Гц	Растекание спектра (оценивалось по амплитуде на частоте 40 Гц)
1	Прямоугольное окно (БПФ)	159,3	2	0,74
2	Окно Ханна	159,7	6	0,008
3	Окно Хэмминга	159,7	6	0,1
4	Окно Блэкмана	159,8	6	0,003
5	Окно Блэкмана-Наталла	159,8	8	0,0004
6	Окно Флэттоп	160	10	0,0002

Таблица 2.3. Результаты определения гармонической составляющей с амплитудой 160 о.е. и частотой 50 Гц с помощью различных окон при времени записи сигнала 1,005 сек

№	Наименование окна	Значение амплитуды	Ширина главного лепестка	Растекание спектра (оценивалось на частоте 40 Гц)
1	Прямоугольное окно (БПФ)	137,4	2	3,93
2	Окно Ханна	150,9	6	0,035
3	Окно Хэмминга	148,9	6	0,553
4	Окно Блэкмана	152,9	6	0,014
5	Окно Блэкмана-Наталла	154,5	8	0,0011
6	Окно Флэттоп	160	10	0,00153

Таблица 2.4. Результаты определения гармонической составляющей с амплитудой 160 о.е. и частотой 50 Гц с помощью различных окон при времени записи сигнала 1,01 сек

№	Наименование окна	Значение амплитуды	Ширина главного лепестка	Растекание спектра (оценивалось на частоте 40 Гц)
1	Прямоугольное окно (БПФ)	102,5	2	5,655
2	Окно Ханна	135,8	6	0,048
3	Окно Хэмминга	130,9	6	0,796
4	Окно Блэкмана	141	6	0,02
5	Окно Блэкмана-Наталла	145,1	8	0,0016
6	Окно Флэттоп	159,8	10	0,002

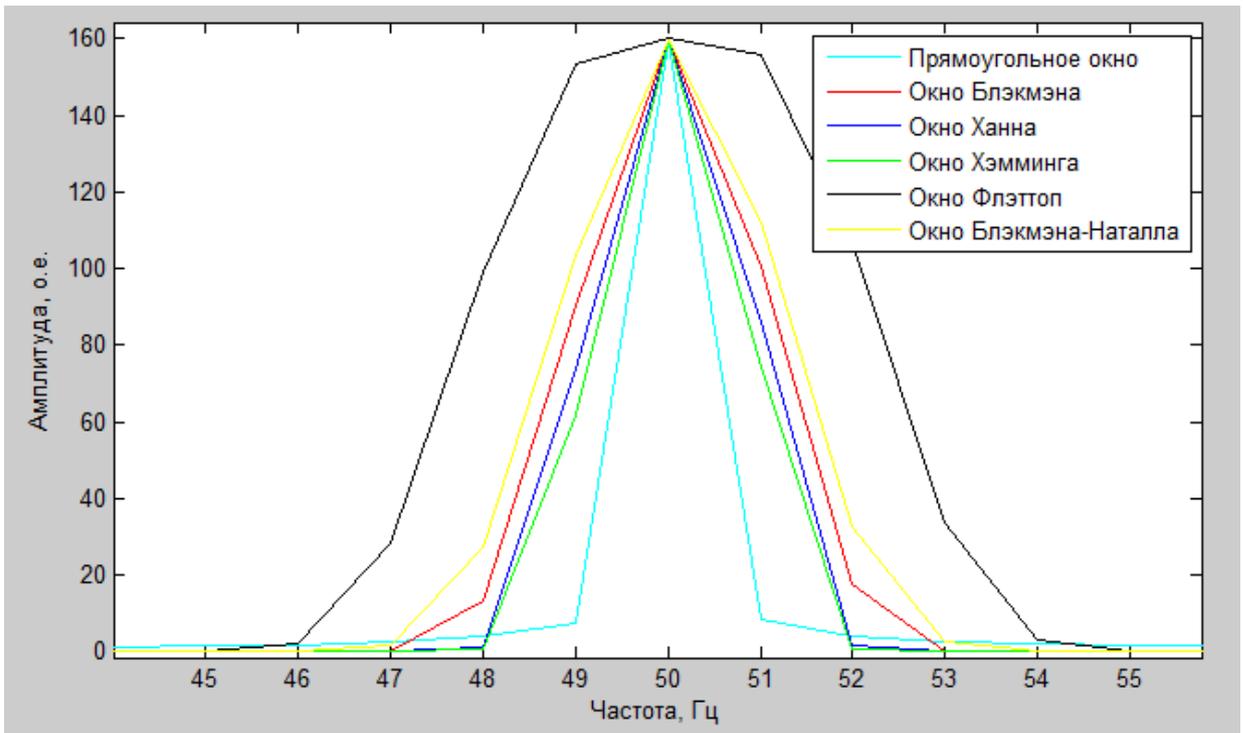


Рис. 2.7. Представление искомой гармоники в спектре при применении различных окон при времени записи сигнала 1 сек (с минимальным эффектом растекания спектра)

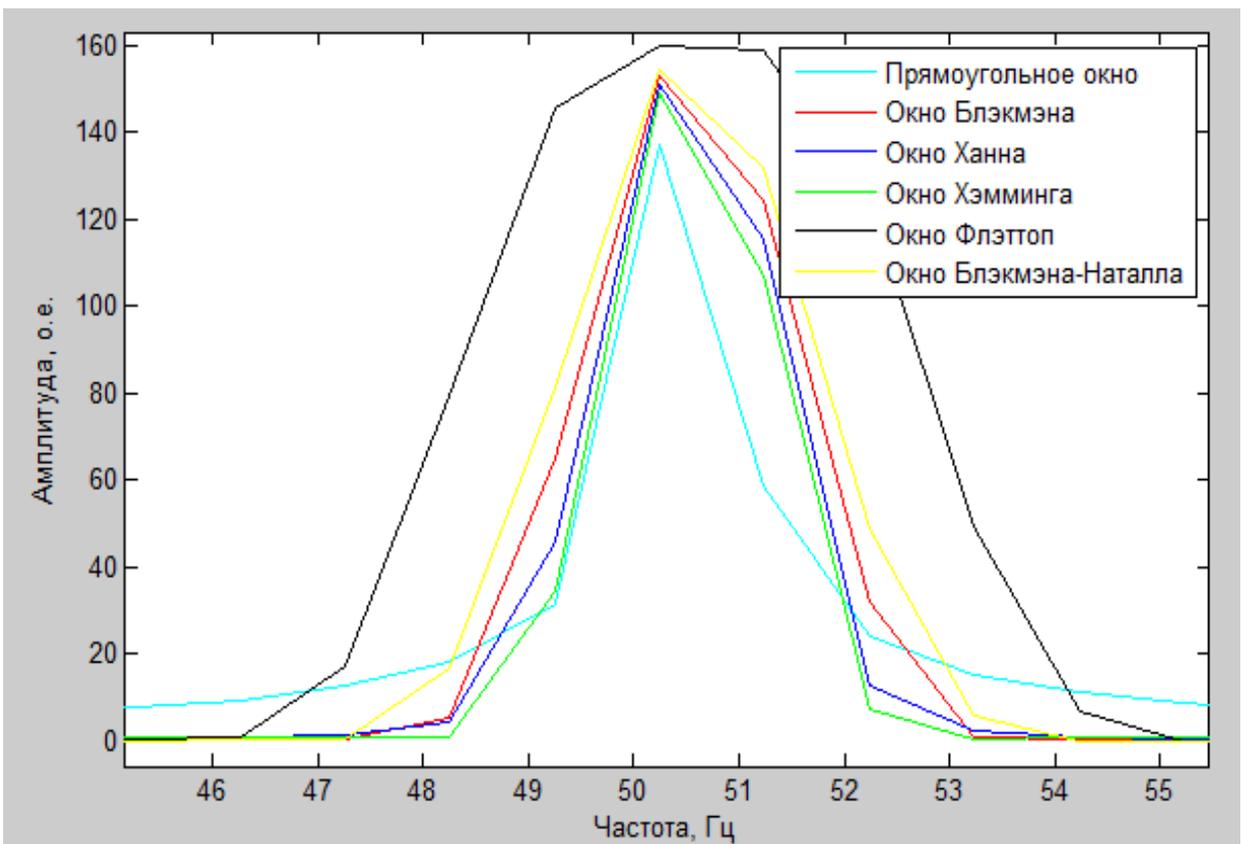


Рис. 2.8. Представление искомой гармоники в спектре при применении различных окон при времени записи сигнала 1.005 сек (с малым эффектом растекания спектра)

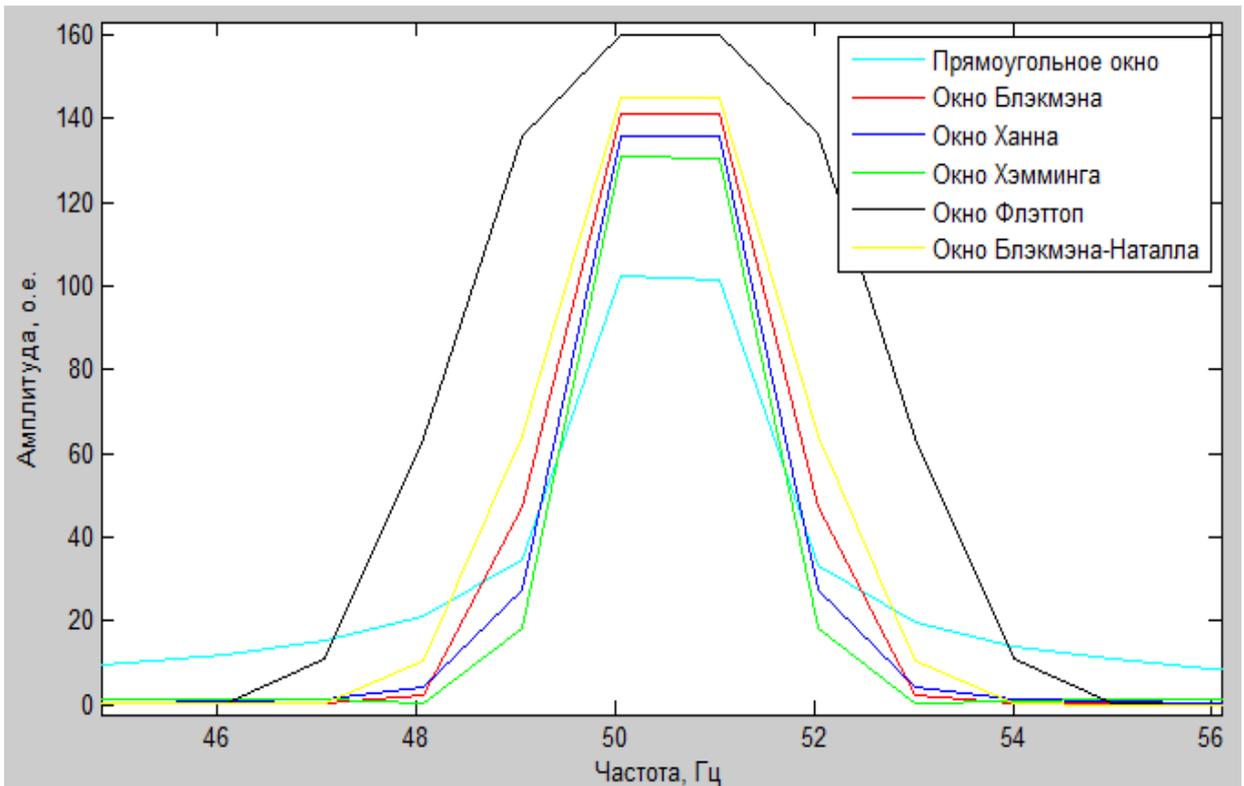


Рис. 2.9. Представление искомой гармонической составляющей в спектре при применении различных окон при времени записи сигнала 1.009 сек (с максимальным эффектом растекания спектра)

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы. При применении ОПФ с оконными функциями низкого разрешения существенно возрастает ширина основного лепестка определяемой гармонической составляющей. С другой стороны, применение подобных оконных функций позволяет практически полностью исключить влияние эффекта растекания спектра, в то время как применение окон высокого разрешения может привести к существенному искажению спектра гармонических составляющих с низкими амплитудами. Кроме того, применение окон низкого разрешения позволяет значительно более точно определять амплитуды гармонических составляющих. Так, применение окна Флэттоп позволило точно определить амплитуду гармонической составляющей даже при максимально выраженном эффекте растекания спектра, в то время как при прямоугольном окне в этом случае амплитуда получилась более чем в полтора раза меньше (как видно из таблицы 2.4). Таким образом, учитывая поставленные ранее задачи, наиболее оптимальным для дальнейшего использования можно считать окно Флэттоп, позволяющее с большой точностью определять амплитуды сигналов без выраженного эффекта растекания спектра.

Однако, как было отмечено ранее, применение окон низкого разрешения приводит к тому, что главный лепесток окна получается значительно шире, чем при применении БПФ. Например, ширина главного лепестка окна Флэттоп в 5 раз превышает ширину главного лепестка прямоугольного окна (что хорошо видно из рис. 2.7). С учетом того, что интервалы, на которые необходимо разделять пусковой сигнал, должны иметь малую продолжительность, необходимо определить критерии, когда может быть использовано ОПФ на основе окна Флэттоп. Если же в процессе построения спектра нет необходимости точного определения амплитуд и нужно лишь определить поведение гармоник, то применение окон более высокого разрешения позволит работать с менее жесткими требованиями.

2.5. Вывод необходимых условий возможности применения оконного преобразования Фурье при анализе пусковых сигналов внешнего магнитного поля высоковольтных асинхронных электродвигателей с длительным пуском

Первым делом для применения ОПФ при обработке сигналов ВМП высоковольтных АД СН необходимо определить необходимую продолжительность интервалов ΔT , на которые разделяется пусковой сигнал, для возможности корректного отображения ЧВС поля на основе ОПФ. Для этого рассмотрим взаимное расположение в спектре различных частотных составляющих (на примере нижних боковых частот гармоник от ФОР). Как уже было показано, при изменении скольжения изменение нижних боковых частот гармоник от ФОР выглядит так, как показано на рис. 2.10 (в качестве примера показаны частоты гармоник для АД с 4 парами полюсов).

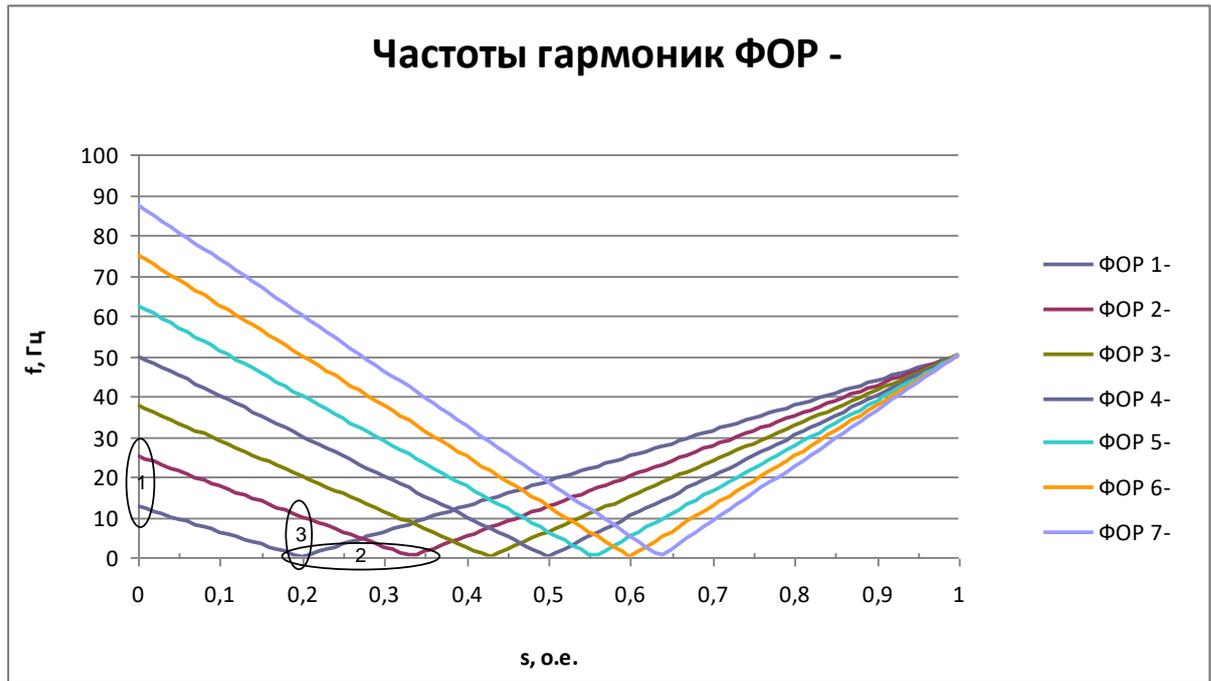


Рис. 2.10. Изменение нижних боковых частот гармоник от ФОР АД с 4 парами полюсов при изменении скольжения

Если предположить, что во время пуска скорость двигателя возрастает по близкой к равномерной зависимости от времени (что справедливо при достаточно большой продолжительности времени пуска), можно оценить расстояние между различными гармоническими составляющими как по времени, так и по частоте, в любой момент времени. При выявлении в спектре нижних боковых частот гармоник от ФОР наиболее удобным будет область, в которой начинается отражение от оси скольжения предельно учитываемой при анализе гармоник от ФОР. Из рис. 2.1 и 2.2 хорошо видно, что при уменьшении скольжения (то есть приближении к установившемуся режиму) расстояние между соседними гармониками как по частоте, так и по времени, будет только возрастать. Поэтому условием корректности работы могут выступать следующие условия: в момент достижения предельно учитываемой гармоники частоты 0 Гц она не должна сливаться в спектре с другими частотами как по времени (в качестве примера приведен интервал 2 на рис. 2.10 для первой гармоники), так и по частоте (на рис. 2.10 интервал 3 для первой гармоники). Если эти условия будут выполняться, то, несмотря на дальнейшие пересечения друг с другом, эти гармоники могут быть отчетливо выявлены в спектре.

Рассмотрим условия, при которых при достижении нулевой частоты гармоники не будут сливаться в спектре:

1) *Необходимое разрешение по времени.*

Как уже было отмечено ранее, принимается, что скорость АД увеличивается равномерно с течением времени. В этом случае возможно определить момент, в который любая гармоническая составляющая на нижней боковой частоте достигнет оси частоты. Как видно из рис. 2.10, за весь интервал пуска частота гармоники изменяется от f_c до 0, после чего возрастает до значения $\nu \cdot \frac{f_c}{p}$, где ν – порядок гармоники от ФОР. Тогда время, при котором гармоника от ФОР ν -го порядка достигнет нулевой частоты, может быть определено по выражению:

$$T_{0\nu} = \frac{f_c}{f_c + \nu \cdot \frac{f_c}{p}} \cdot T_n = \frac{1}{1 + \frac{\nu}{p}} \cdot T_n = \frac{1}{\frac{p + \nu}{p}} \cdot T_n = \frac{p}{p + \nu} \cdot T_n, \quad (2.12)$$

где $T_{0\nu}$ – время достижения нижней боковой частоты гармоники от ФОР ν -го порядка нулевого значения, с;

T_n – время пуска асинхронного двигателя, с.

Определим разницу времен достижения нулевой частоты двух соседних гармоник от ФОР (ν и $\nu + 1$ порядка):

$$\Delta T_{0\nu} = T_{0\nu} - T_{0(\nu+1)} = \frac{p}{p + \nu} \cdot T_n - \frac{p}{p + \nu + 1} \cdot T_n = \frac{p \cdot (p + \nu + 1) - p \cdot (p + \nu)}{(p + \nu) \cdot (p + \nu + 1)} \cdot T_n$$

$$T_n = \frac{p^2 + p \cdot \nu + p - p^2 - p \cdot \nu}{(p + \nu) \cdot (p + \nu + 1)} \cdot T_n = \frac{p}{(p + \nu) \cdot (p + \nu + 1)} \cdot T_n \quad (2.13)$$

Таким образом, для возможности обнаружения в ЧВС всех нижних боковых полос гармонических составляющих от ФОР первых ν порядков необходимо, чтобы ширина гармоники по времени ΔT не превышала разницу по времени перехода ν и $\nu + 1$ гармоники (выражение (2.13)), то есть должно выполняться следующее условие:

$$\Delta T < \frac{p}{(p + \nu_{\max}) \cdot (p + \nu_{\max} + 1)} \cdot T_n, \quad (2.14)$$

где ν_{\max} – порядок предельно учитываемой гармоники.

2) *Необходимое разрешение по частоте.*

Хорошо известно, что в установившемся режиме значение скольжения асинхронного двигателя близко к 0. При таких значениях скольжения расстояние между соседними гармониками от ФОР (на рис. 2.9 интервал 1) может быть приблизительно определено по выражению:

$$\Delta f_{\text{ФОР уст}} = \frac{f_c}{p}, \quad (2.15)$$

где $\Delta f_{\text{ФОР уст}}$ – разница между частотами от ФОР соседних гармоник в установившемся режиме работы, Гц.

Тогда разница между нижними боковыми частотами гармоник от ФОР соседних порядков в любой момент времени t , в частности, в момент перехода гармоники ν порядка через 0, может быть определена по выражению:

$$\Delta f_{\text{ФОР}}(t) = \frac{f_c}{p} \cdot \frac{t}{T_n}, \quad (2.16)$$

где $\Delta f_{\text{ФОР}}(t)$ – разница между частотами от ФОР соседних гармоник в момент времени t , Гц,

$0 \leq t \leq T_n$ – момент времени, с.

Соответственно, подставив в выражение (2.16) время перехода через 0 предельно учитываемой гармоники, можно получить минимальную разницу между частотами гармоник от ФОР по частоте, которая может повлиять на возможность использования ЧВС.

$$\Delta f_{\text{ФОР}0_{\max}} = \frac{f_c}{p} \cdot \frac{T_{0\nu_{\max}}}{T_n} = \frac{f_c}{p} \cdot \frac{p}{p + \nu_{\max}} \cdot \frac{T_n}{T_n} = \frac{f_c}{p + \nu_{\max}}, \quad (2.17)$$

где $\Delta f_{\text{ФОР}0_{\max}}$ – разница нижних боковых частот соседних гармоник в момент отражения предельно учитываемой гармоники от оси скольжения;

$T_{0\nu_{\max}}$ – время достижения нулевой частоты предельно учитываемой гармоники от ФОР.

Соответственно, ширина гармоник от ФОР в спектре должна быть такой, чтобы соседние гармоники не сливались друг с другом. Для этого необходимо, чтобы ширина главного лепестка искомым гармоник в спектре не превышала $\Delta f_{\text{ФОР}}$.

Для корректного выявления гармоник в спектре в момент отражения от оси скольжения (по рис. 2.10) необходимо, чтобы ширина двух соседних гармоник в спектре по частотной оси не превышала разницы значений предельно учитываемых гармонических составляющих от ФОР (поскольку чем выше порядок гармоники, тем меньше будет разница по времени между этой гармоникой и последующей). Хорошо известно, что максимально возможные разрешения по частоте и по времени, которых можно добиться при построении спектра, связаны следующим образом [111]:

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1,$$

где Δt – разрешение сигнала по времени (которое равно продолжительности интервала разбиения сигнала ΔT), с;

Δf – разрешение сигнала по частоте, Гц.

При использовании ОПФ следует учитывать ширину окна, которая оказывает влияние и на ширину гармоники по частотной оси. Если в качестве параметра, характеризующего ширину главного лепестка применяемого окна, принять относительную ширину главного лепестка по сравнению с прямоугольным окном ΔF (который в соответствии с табл. 2.2-2.4 равен 5 для окна Флэттоп), то ширина гармоники по частотной оси может быть определена по выражению:

$$\Delta f = \frac{2 \cdot \Delta F}{\Delta T}. \quad (2.18)$$

Таким образом, разрешение по частоте будет достаточным, если выполняется следующее условие:

$$\begin{aligned} \Delta f &< \frac{f_c}{p + v_{\max}}; \\ \frac{2 \cdot \Delta F}{\Delta T} &< \frac{f_c}{p + v_{\max}}; \\ \Delta T &> \frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})}{f_c}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Объединив выражения (2.14) и (2.19), получим границы интервала разбиения, при которых ОПФ позволит обнаружить в спектре гармонические составляющие от ФОР первых v порядков:

$$\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})}{f_c} < \Delta T < \frac{p}{(p + v_{\max}) \cdot (p + v_{\max} + 1)} \cdot T_n. \quad (2.20)$$

Исходя из выражения (2.20), можно определить минимально допустимое время пуска, при котором возможно применение разработанного алгоритма:

$$\begin{aligned} T_{n\min} &> \frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})}{f_c} \cdot \frac{(p + v_{\max}) \cdot (p + v_{\max} + 1)}{p}; \\ T_{n\min} &> \frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})^2 \cdot (p + v_{\max} + 1)}{f_c \cdot p}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Аналогично можно вывести выражения для гармоник на верхних боковых частотах. Если рассмотреть изменение верхних боковых частот гармоник от ФОР первых порядков (рис. 2.1б, 2.2б), видно, что в процессе пуска разница частот между соседними гармоническими составляющими будет только возрастать, поэтому достаточно выполнения условия, описанных для отраженных гармонических составляющих, но в момент выхода на установившийся режим работы. В этом случае расстояние между соседними гармониками и по времени, и по частоте будет больше, чем в момент отражения предельно учитываемой гармоники (например, как можно увидеть при сравнении формул (2.15) и (2.16)), поэтому полученное выражение (2.20) будет достаточным и для корректного отображения в ЧВС гармоник на верхних боковых частотах.

Для получения корректных результатов анализа спектра достаточным можно считать четкое проявление в спектре первых трех гармонических составляющих, амплитуды которых в спектре довольно велики. При

использовании в качестве оконной функции окна Флэттоп получены следующие значения минимально допустимого времени пуска для отчетливого проявления в спектре гармоник первых трех порядков: для АД с 1 парой полюсов – 16 сек, с 2 парами полюсов – 15 сек, с 3 парами полюсов – 16,8 сек, с 4 парами полюсов – 19,6 сек, с 5 парами полюсов – 23,04 сек, с 6 парами полюсов – 27 сек. Данное время превышает время пуска даже многих АД, рассматриваемых в данной диссертационной работе. Однако следует отметить, что выведенное выше условие является достаточным для корректного отображения спектра, однако в большинстве случаев требуется значительно меньшее время пуска. Это обусловлено следующими факторами:

1) поскольку при проведении практических расчетов допустимо иметь погрешность определения значений искомых величин, составляющую 5-10%, следует отметить, что ширина основных лепестков применяемых оконных функций будет значительно ниже той, которая может быть оценена по выражению (2.18). Например, на рис. 2.7-2.9 видно, что диапазон частот, на которых амплитуда гармоники не снижается менее 10% от заданной величины (160) составляет почти вдвое меньше, чем указанные значения (от 5 до 7 Гц вместо 10 Гц). Также при использовании перекрытия интервалов, на которые разбивается сигнал (то есть если новый интервал захватывает часть предыдущего) аналогичный вывод будет справедлив и для условия необходимого разрешения по времени. Поэтому допустимо (для наихудшего из указанных случаев) увеличить определенные интервалы в 1,5 раза (минимум, определяемый разрешением по частоте, и максимум, определяемый разрешением по времени).

2) Рассматриваемые условия выведены для момента времени отражения от оси скольжения гармоники от ФОР на минусовой частоте предельно учитываемого порядка. В то же время при приближении к установившемуся режиму расстояние по времени и по частоте между указанными гармоническими составляющими будет только возрастать, поэтому может быть возможность различить их в спектре при приближении к установившемуся режиму даже в том случае, если они будут сливаться в момент отражения. Поскольку отражение

гармоники от ФОР 3 порядка на нижней боковой частоте для АД с числом пар полюсов от 1 до 6 происходит при скольжениях 0,666 и менее, допустимо также увеличить максимум разрешения по времени и по частоте еще в 1,5 раза.

В связи с вышесказанным, условие (2.20), а, следовательно, и (2.21) можно записать в виде:

$$\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})}{2.25 \cdot f_c} < \Delta T < \frac{2.25 \cdot p}{(p + v_{\max}) \cdot (p + v_{\max} + 1)} \cdot T_n. \quad (2.22)$$

$$T_{n\min} > \frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})^2 \cdot (p + v_{\max} + 1)}{5 \cdot f_c \cdot p}. \quad (2.23)$$

При расчете по формуле [2.23] при описанных ранее условиях минимальное время пуска АД, при котором можно выявить в спектре гармоники от ФОР первых трех порядков будет составлять: для АД с 1 парой полюсов – 3,2 сек, с 2 парами полюсов – 3 сек, с 3 парами полюсов – 3,36 сек, с 4 парами полюсов – 3,92 сек, с 5 парами полюсов – 4,61 сек, с 6 парами полюсов – 5,4 сек. Таким образом, для корректного отображения спектра требуется время пуска, составляющее приблизительно 3-6 секунд для двигателей с различным числом пар полюсов для того, чтобы в спектре четко проявлялись гармоники первых трех порядков.

Это не позволяет производить оценку подобным методом для АД с малым временем пуска (менее 3 с), например, для высоковольтных АД механизмов насосной группы, к которым относятся питательный, конденсатный, циркуляционный и другие насосы электростанций. Поэтому в случае необходимости при малом, близком к граничному, времени пуска требуется учитывать меньшее количество гармонических составляющих.

2.6. Вывод необходимых условий возможности применения оконного преобразования Фурье при анализе пусковых сигналов тока статора высоковольтных асинхронных электродвигателей с длительным пуском

Определим по аналогии с разделом 2.5 необходимые условия для получения корректного спектра для сигнала тока статора, а именно достаточные разрешения по частоте и по времени, а также необходимое время пуска АД. Особенностью сигнала тока статора, как было показано в разделе 2.2, является то, что в спектре достаточно обнаружить и оценить амплитуду лишь одной гармонической составляющей (ФОР p -), остальные гармоники в спектре практически не проявляются. Поэтому единственной гармоникой, которая затрудняет процесс диагностирования, является основная гармоника сигнала.

На рис. 2.11 представлено графическое представление расположения гармоник в процессе пуска с учетом их разрешения по частоте и по времени. Для отчетливого проявления гармоники в спектре необходимо, чтобы хотя бы на определенных интервалах в течение пуска можно было разделить искомую гармонику от ФОР p - и основную гармонику сигнала (50 Гц). Для тока статора при аналогичных допущениях и соображениях необходимо выполнение следующих условий:

1) в момент отражения гармоники от оси скольжения она не должна сливаться с основной гармонической составляющей (в качестве примера приведен интервал 1 на рис. 2.11). Чтобы можно было отчетливо увидеть это в спектре, примем, что расстояние между точками А и D на рис. 2.11 должно составлять не менее $\Delta f / 2$;

2) участки снижения и возрастания частоты на спектре должны быть различимы и не сливались друг с другом хотя бы с момента, когда на нее не оказывает влияния основная гармоника по частотной оси (интервал 2 на рис.

2.11). Примем, что достаточное расстояние между точками В и С на рис. 2.11 должно составлять не менее $\Delta t / 2$.

Если эти условия будут выполняться, то в спектре получится выделить отдельно искомую гармоническую составляющую и точно оценить ее амплитуду.

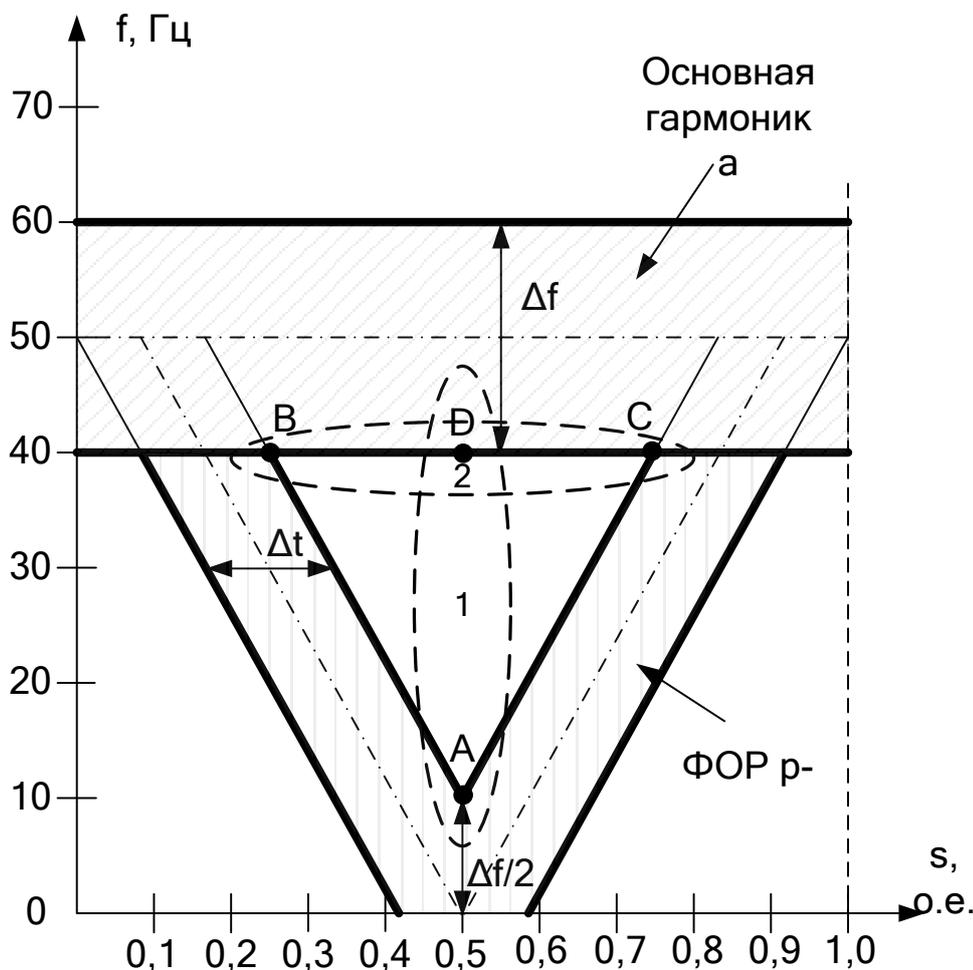


Рис. 2.11. Взаимное расположение гармоник в спектре тока статора в процессе пуска АД с учетом разрешений по времени и частоте

1) Необходимое разрешение по частоте.

Как было описано ранее, в предельном случае достаточно, чтобы хотя бы при скольжении 0,5 гармоники от ФОР p^- и ФОР p^+ в спектре не сливались друг с другом. Без учета разрешений по частоте расстояние между гармониками составляет f_c . Фактическое же расстояние между гармониками с учетом малого времени пуска и, следовательно, низкого разрешения по частоте, как видно из рис. 2.11, значительно меньше и может быть определено как:

$$\Delta f_{\text{ФОР}}(0,5) = (f_c - \frac{\Delta f}{2}) - (0 + \frac{\Delta f}{2}) = f_c - \Delta f. \quad (2.24)$$

Отсюда, чтобы гармоники отчетливо проявлялись в спектре, то есть чтобы $\Delta f_{\text{ФОР}}(0,5) \geq \frac{\Delta f}{2}$ необходимо, чтобы разрешение по частоте $\Delta f \leq \frac{2}{3} f_c$. Так как разрешение по частоте связано с продолжительностью интервалов по выражению (2.18), можно записать следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{2 \cdot \Delta F}{\Delta T} &< \frac{2}{3} \cdot f_c; \\ \Delta T &> \frac{3 \cdot \Delta F}{f_c}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Таким образом, при выполнении условия (2.25) разрешение по частоте будет достаточным.

2) Необходимое разрешение по времени.

Наиболее неблагоприятным случаем, который может возникнуть при построении спектра, является случай, когда гармоники можно различить лишь на небольшом участке, где $s \approx 0,5$. При этом рассматриваемый участок 2 на рис. 2.11 будет на частоте приблизительно равной $f_c / 2$, и с учетом ранее указанных допущений разница по времени между моментами спада и подъема частоты будет составлять примерно половину от времени пуска. Тогда условие, обеспечивающее достаточность разрешения по времени, как видно из рис. 2.11 при соблюдении условия разницы между точками В и С не менее $\Delta t / 2$, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \Delta T &\leq \frac{T_n}{2}; \\ \Delta T &\leq \frac{T_n}{3}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Как и в случае сигнала ВМП, объединим выражения (2.25) и (2.26) для определения необходимой продолжительности интервалов, на которые разбивается диагностический сигнал, и оценим минимальную продолжительность пуска, при котором мы можем произвести обработку сигнала тока статора и выделить в нем гармонику от ФОР р-:

$$\frac{3 \cdot \Delta F}{f_c} < \Delta T < \frac{T_n}{3}. \quad (2.27)$$

$$T_{n\min} > \frac{9 \cdot \Delta F}{f_c}. \quad (2.28)$$

Следует отметить, что в данном случае описанные при выводе условий для спектра ВМП недопустимы, поскольку в данном случае необходимо точно убедиться в том, что в спектре действительно имеется отраженная составляющая, а не гармоники или шумы, не связанные с повреждением ОР. При подстановке всех необходимых параметров в выражение (2.28) получается, что независимо от числа пар полюсов высоковольтного АД достаточно времени пуска, составляющего 0,9 сек. Очевидно, что проводить контроль технического состояния ОР АД по току статора возможно при значительно более кратковременном пуске по сравнению с сигналом ВМП.

2.7. Разработка алгоритма в программном комплексе Matlab для анализа частотно-временных спектров высоковольтных асинхронных двигателей с длительным пуском в пусковых режимах

По результатам проведенных исследований в программном комплексе MatLab был разработан алгоритм, позволяющий производить автоматизированный анализ пусковых сигналов высоковольтных АД СН с длительным пуском. В основе алгоритма находится ОПФ, в качестве основного окна применяется окно Флэттоп, однако в случае необходимости оно может быть заменено на другие перечисленные ранее оконные функции. Реальные амплитуды гармонических составляющих определяются в соответствии с выражением (2.11). Длительность интервалов, на которые разбивается пусковой сигнал, принимается близкой к среднему значению определенного ранее по выражению (2.22) или (2.27) интервала.

Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рис. 2.12. Данная блок-схема включает следующие блоки (в соответствии с рис. 2.12):

1) Ввод исходных данных. Необходимыми для расчета исходными данными являются:

- оцифрованный зарегистрированный сигнал. В качестве такого сигнала могут быть использованы сигналы ВМП и тока статора АД при пуске, однако также подобным образом можно произвести обработку и сигнала внутреннего магнитного поля АД при проведении экспериментов на физических и математических моделях;

- время момента начала и окончания пуска АД, по которым определяется длительность его пуска;

- число пар полюсов АД (в случае проведения регистрации ВМП);

- применяемая оконная функция;

- порядок предельно учитываемой гармоники (для ВМП).

2) Проверка выполнения условия (2.23) или (2.28) для заданных исходных данных. Если условие выполняется, то возможно построение спектра со всеми исходными параметрами, в противном случае требуется изменение исходных данных.

3) По выражению (2.22) или (2.27) определяется необходимая длительность интервалов, при которой возможно построение ЧВС пускового сигнала. В дальнейшем автоматически выбирается продолжительность интервала, величина которой близка к минимально допустимой. В случае необходимости возможно задание продолжительности интервала вручную в допустимом диапазоне.

4) Производится ОПФ. В результате получается ЧВС пускового сигнала АД. В качестве оконной функции рекомендуется использовать окно Флэттоп или другое окно низкого разрешения, но в случае необходимости можно использовать и другую оконную функцию.

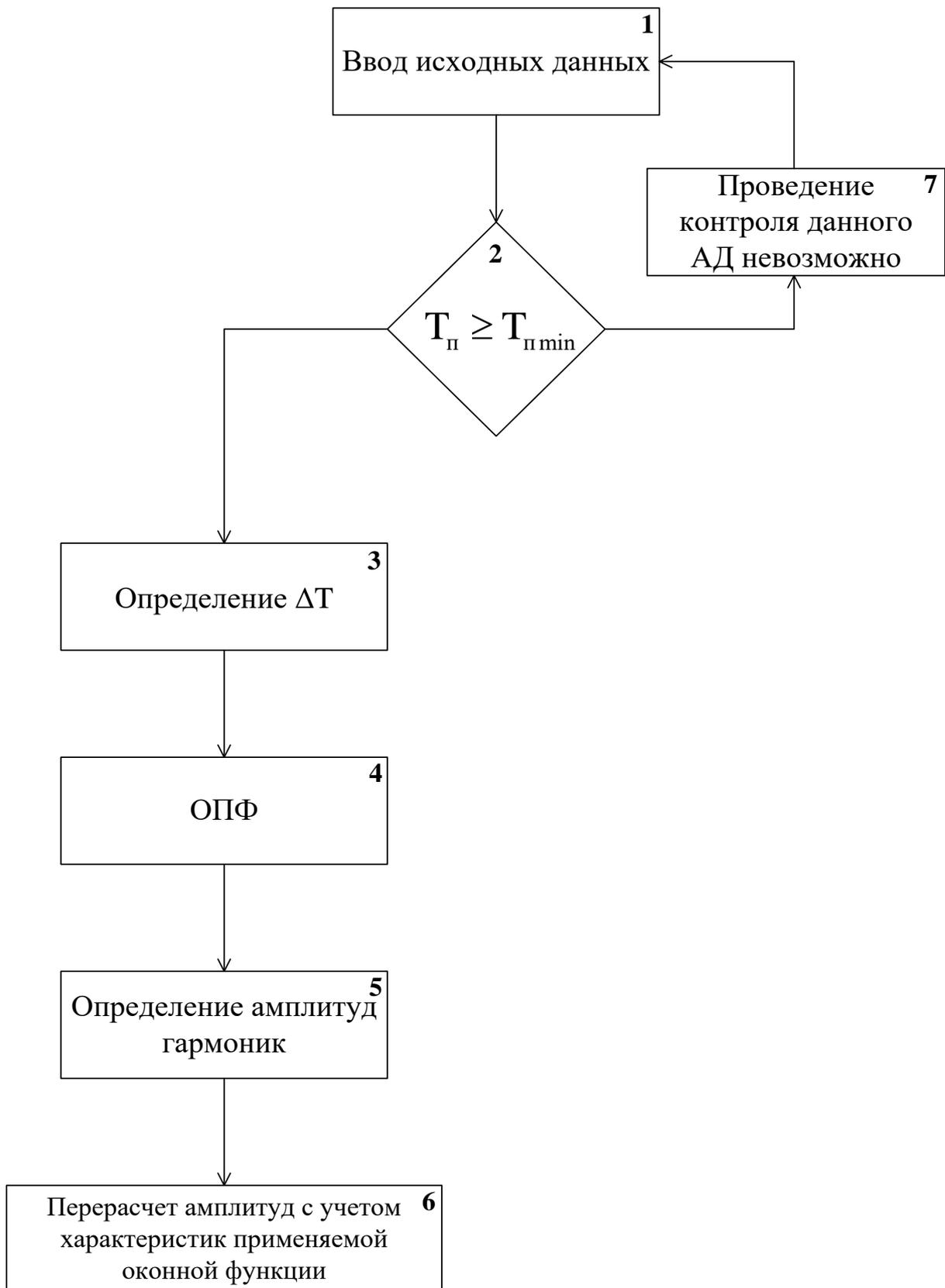


Рис. 2.12. Блок-схема разработанного алгоритма анализа ЧВС пусковых сигналов АД

5) В этом спектре оцениваются амплитуды гармоник от ФОР на нижней боковой частоте в интересующий момент времени, начиная с момента отражения

от оси в спектре гармоник предельно учитываемого порядка, для сигнала ВМП, и гармоник от ФОР p - для сигнала тока статора в любой момент времени, когда она не сливается с основной гармоникой.

6) Производится перерасчет амплитуд гармоник от ФОР для определения их реальных величин по выражению (2.11).

7) В случае невыполнения условия (2.23) или (2.28) сообщается о невозможном проведении контроля для данного типа АД.

2.8. Проверка корректности разработанного алгоритма

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма в программном комплексе MatLab был создан тестовый сигнал, моделирующий изменение гармонических составляющих от ФОР в спектре ВМП при пуске АД с 3 парами полюсов. Сигнал содержит гармонические составляющие от ФОР первых 4 порядков (что соответствует решению задачи выделения в спектре первых трех составляющих). Параметры гармонических составляющих приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Параметры тестового сигнала

№	Наименование гармоники	Значение амплитуды, мкТл	Значение частоты в установленном режиме, Гц
1	ФОР 1-	8	16
2	ФОР 2-	6	33
3	ФОР 3-	5	50
4	ФОР 4-	2	66
5	ФОР 1+	5	16
6	ФОР 2+	10	33
7	ФОР 3+ (основная гармоника)	50	50
8	ФОР 4+	2	66

Частота дискретизации при исследовании тестового сигнала составляла 1000 Гц. Время пуска двигателя было задано равным 10 сек, что приблизительно соответствует длительности пуска АД механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления электростанций. В результате оценки по выражению (2.22) была определена продолжительность интервалов разбиения:

$$0,53 \text{ с} < \Delta T < 1,61 \text{ с}.$$

Для построения спектра было принято значение ΔT , равное 1,2 сек. Для упрощения расчетов принято, что амплитуды гармонических составляющих с течением времени не изменяются, а также отсутствуют электромагнитные помехи, воздействующие на сигнал. Полученный ЧВС приведен на рис. 2.13. Для более наглядного изображения предельная амплитуда гармоник в спектре ограничена 10 мкТл. Гармоники, имеющие большие амплитуды, отображаются в спектре ярко красным цветом.

Из полученного спектра хорошо видно, что все заданные гармонические составляющие отчетливо проявляются в спектре сигнала (в том числе составляющие с низкими амплитудами), что говорит о возможности обнаружения гармоник в спектре сигнала. Если сравнить спектр с приведенными ранее графиками изменения частот гармоник от ФОР при изменении скольжения АД, видно, что полученные в спектре гармоники сигнала соответствуют расчетным значениям гармоник от ФОР.

Оценим амплитуды полученных в спектре гармоник. Для этого выберем моменты времени, когда гармонические составляющие не пересекаются друг с другом. В качестве таких моментов удобно выбрать $t = 8$ сек и $t = 9,2$ сек (отмечены на рис. 2.13 пунктирными линиями). Для этих моментов времени были построены амплитудные спектры, которые приведены на рис. 2.14 и 2.15 соответственно. Для удобства сравнения реальных значений амплитуд гармонических составляющих и полученных в спектре АД в моменты времени 8 и 9,2 сек приведены в табл. 2.6 и 2.7. Погрешность определения амплитуды рассчитана по следующему выражению:

$$\varepsilon = \frac{|A - A_0|}{A_0} \cdot 100\%, \quad (2.29)$$

ε – относительная погрешность определения амплитуды, %;

A – значение амплитуды гармоники, определенное с помощью разработанного алгоритма;

A_0 – заданное значение амплитуды.

Сравнивая амплитуды гармоник в спектре с их реальными значениями можно увидеть, что амплитуды гармонических составляющих с достаточной точностью соответствуют действительным. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет построить ЧВС высоковольтных АД СН электростанций, а также с приемлемой точностью определять амплитуды всех гармонических составляющих.

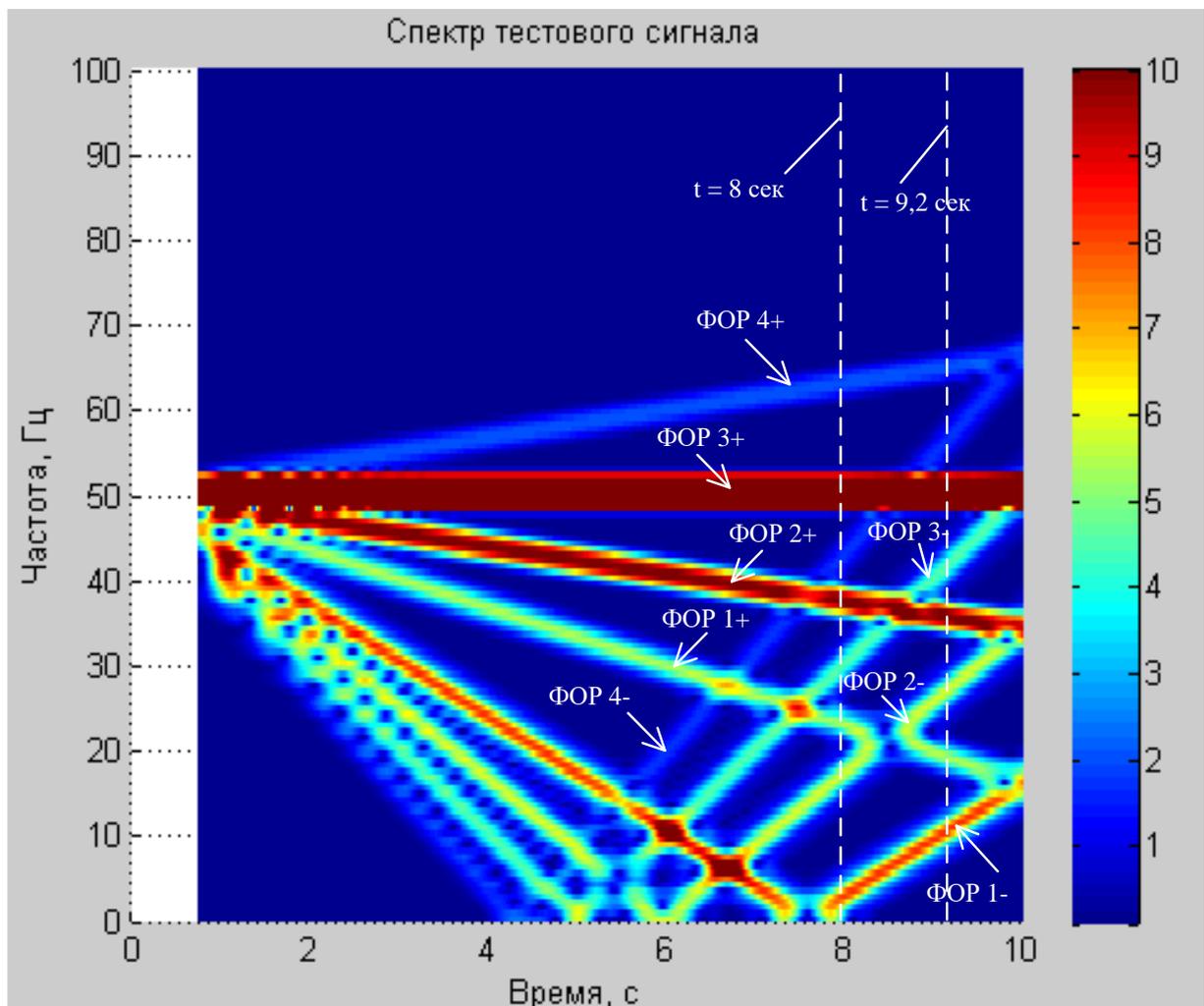


Рис. 2.13. ЧВС тестового сигнала АД с 3 парами полюсов

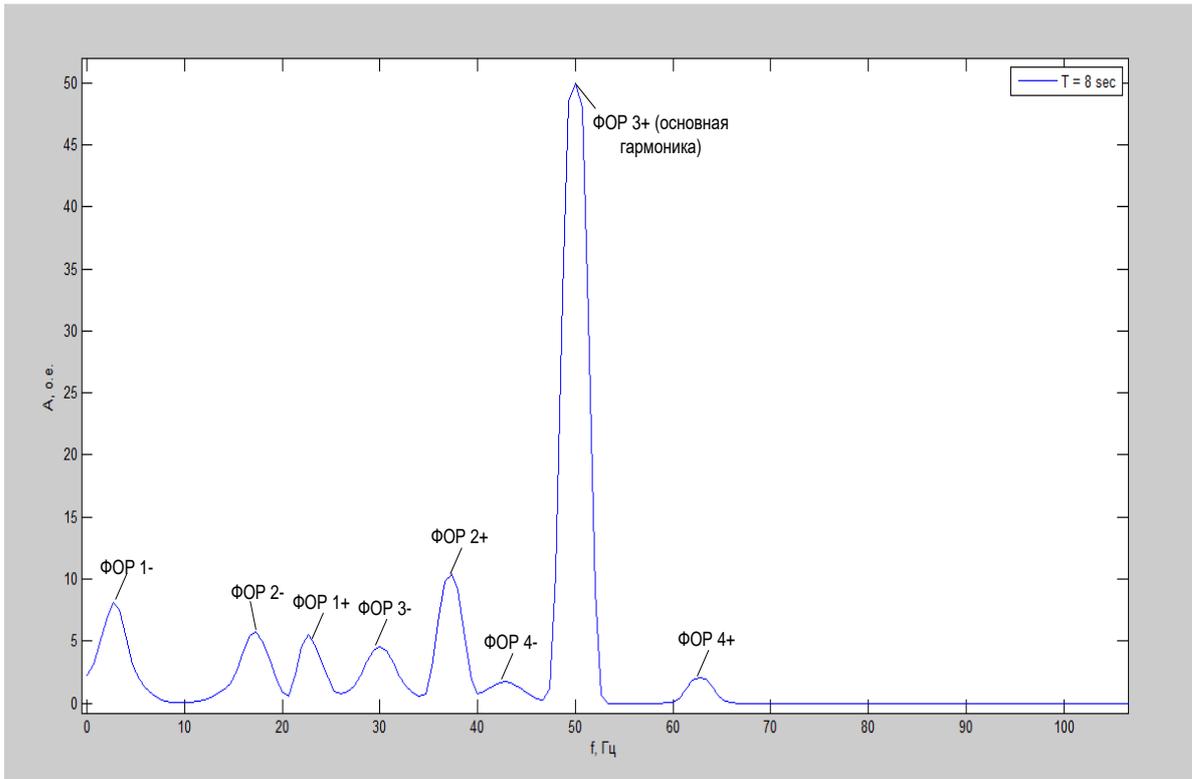


Рис. 2.14. Амплитудный спектр тестового сигнала в момент времени $t = 8$ сек с момента пуска АД

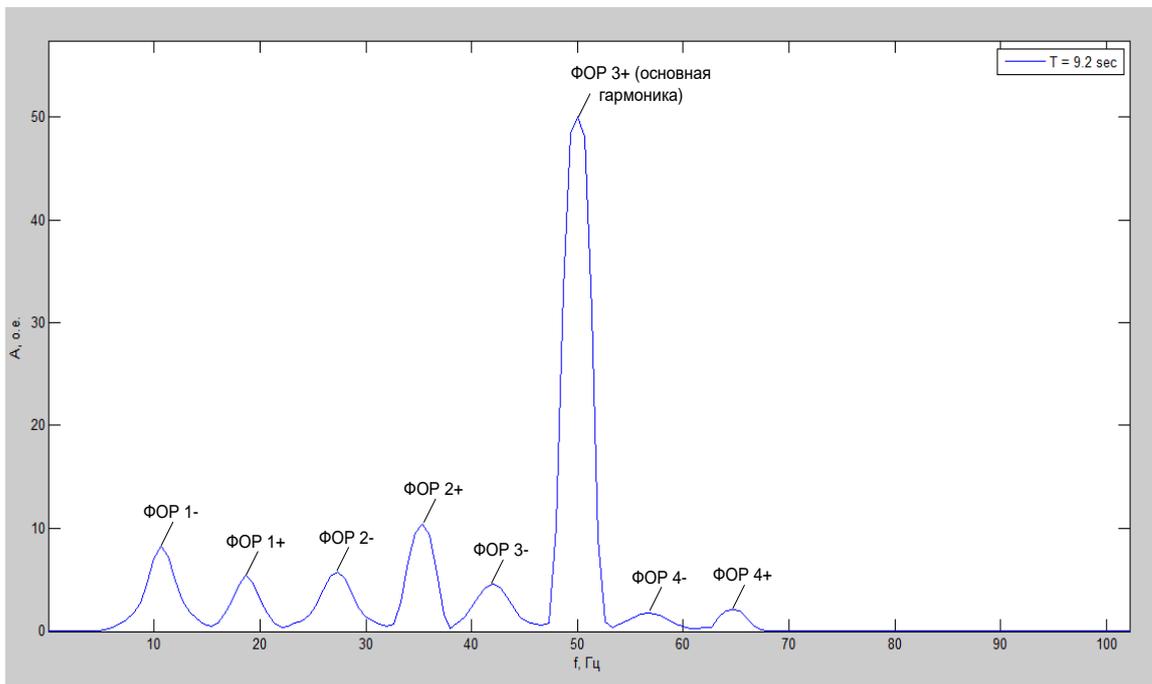


Рис. 2.15. Амплитудный спектр тестового сигнала в момент времени $t = 9,2$ сек с момента пуска АД

Таблица 2.6. Определенные по алгоритму амплитуды гармоник в момент времени $t = 8$ сек

№	Наименование гармоники	Определенное значение амплитуды, о.е.	Заданное значение амплитуды, о.е.	Относительная погрешность определения амплитуды, %
1	ФОР 1-	8,124	8	1,55
2	ФОР 2-	5,774	6	3,77
3	ФОР 3-	4,555	5	8,9
4	ФОР 4-	1,805	2	9,75
5	ФОР 1+	5,428	5	8,56
6	ФОР 2+	10,43	10	4,12
7	ФОР 3+ (основная гармоника)	50,06	50	0,12
8	ФОР 4+	2,075	2	3,75

Таблица 2.7. Определенные по алгоритму амплитуды гармоник в момент времени $t = 9,2$ сек

№	Наименование гармоники	Определенное значение амплитуды, о.е.	Заданное значение амплитуды, о.е.	Относительная погрешность определения амплитуды, %
1	ФОР 1-	8,247	8	3,08
2	ФОР 2-	5,788	6	3,53
3	ФОР 3-	4,55	5	9
4	ФОР 4-	1,82	2	9
5	ФОР 1+	5,459	5	9,18
6	ФОР 2+	10,37	10	3,7
7	ФОР 3+ (основная гармоника)	50,01	50	0,02
8	ФОР 4+	2,054	2	2,7

Выводы по главе 2

1. Произведен анализ изменения частот гармоник от ФОР в пусковых сигналах АД. Показано, что характер изменения частот гармоник от ФОР одного порядка на верхней и нижней боковых частотах существенно различается, в частности, характерной особенностью нижних боковых частот является отражение от оси скольжения, скорости вращения или времени.

2. Показана возможность влияния ДЭ на спектр сигналов ВМП при пуске АД. При этом наибольшее влияние ДЭ оказывает на гармоники от ФОР на верхних боковых частотах. В результате сформулирован вывод о том, что наиболее удобным диагностическим признаком наличия дефекта при контроле

технического состояния двигателей по ВМП при их пуске является возрастание амплитуд отраженных гармоник.

3. Показано, что в спектре сигнала тока статора наиболее удобным диагностическим признаком является возрастание амплитуды гармоники от ФОР порядка, совпадающего с числом пар полюсов, на нижней боковой частоте.

4. Показана возможность определения амплитуд и частот гармоник от ФОР путем построения ЧВС пусковых сигналов АД при достаточной длительности пуска последнего на основе ОПФ. Произведен вывод необходимых для корректного построения спектра параметров для различных АД, а также минимальной длительности пуска, при которой возможно проведение контроля.

5. Разработан алгоритм, позволяющий строить ЧВС АД с длительным пуском. Показано, что для работы алгоритма в качестве начальных данных необходимы сам исследуемый сигнал, параметры АД и длительность его пуска, параметры оконной функции и желаемый порядок предельно учитываемой гармоники. На основе алгоритма разработана программа в программном комплексе Matlab.

6. Произведена оценка корректности разработанной программы. Для этого был создан искусственный сигнал, частоты которого совпадают с частотами гармоник от ФОР реального АД с 3 парами полюсов, длительностью 10 сек. В ходе обработки сигнала был получен ЧВС, частоты гармоник в котором изменяются аналогично заданным значениям. Оценка амплитуд гармоник в полученном спектре и их сравнение с действительными заданными значениями показало, что погрешность определения амплитуд гармоник при выполнении определенных условий не превышает 10%, что позволяет корректно определять эти амплитуды на высоковольтных АД СН с длительным пуском.

Материалы второй главы опубликованы в работах [129, 131-136, 140].

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРЫВОВ СТЕРЖНЕЙ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ПУСКОМ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

3.1. Постановка задачи

В настоящее время для проведения исследований в области диагностики АД все чаще применяются разработанные в специальных программных комплексах модели. Одним из таких комплексов является Ansys.

Поскольку проведение экспериментов, связанных с обрывом стержней ОР, затруднительно на реальных АД, то было принято решение первоначально произвести исследования именно на математических моделях высоковольтных двигателей с длительными пусками, разработанных в программном комплексе Ansys. Преимуществом такого подхода является возможность моделирования АД как в исправном состоянии, так и при наличии различных повреждений, в том числе обрывов стержней ОР. Это позволяет оценить влияние конкретных неисправностей АД на ЧВС пускового сигнала.

Для возможности сравнения полученных спектров с реальными АД была разработана также модель двигателя малой мощности, на котором имеется возможность проведения экспериментальных исследований (данные исследования приводятся в 4 главе диссертационной работы). Так как для подобных двигателей время пуска очень мало, то в данной главе необходимо также рассмотреть возможность проведения исследования и на подобных АД при подаче пониженного напряжения для увеличения времени пуска.

Также на математических моделях удобно произвести сравнение разработанных методов контроля с наиболее эффективными из существующих на данный момент, в числе которых можно отметить метод определения обрывов стержней при пуске по току статора [36, 37], метод на основе спектрального

анализа тока статора в установившемся режиме работы (MCSA) [91, 92, 16, 52, 69] и спектрального анализа ВМП в установившемся режиме работы [98, 101, 115].

Таким образом, основными задачами этой главы являются:

- 1) Разработка модели высоковольтных АД с длительным пуском, применяемых в системе СН электростанций, в программном комплексе Ansys;
- 2) Исследование ЧВС моделей высоковольтных АД с длительным пуском при наличии обрывов стержней ОР и ДЭ в пусковом режиме;
- 3) Моделирование процесса длительного пуска высоковольтных АД собственных нужд электростанций на модели двигателя малой мощности при подаче пониженного напряжения и исследование его ЧВС в пусковом режиме;
- 4) Сравнение чувствительности разработанных методов с наиболее эффективными из существующих методов выявления оборванных стержней ОР;
- 5) Оценка помехозащищенности сигнала ВМП при работе находящихся рядом высоковольтных АД тягодутьевого тракта электростанции в момент пуска исследуемого двигателя.

3.2. Разработка математических моделей высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд для анализа сигналов радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля при пуске

Для проведения исследований в программном комплексе Ansys были разработаны модели двух АД высокого напряжения:

- 1) ДАМСО-15-12-8, являющегося приводом дымососов на ТЭЦ-2 города Иваново. Его особенностью является наличие двух ОР (пусковой и рабочей), то есть это двигатель с двойной «беличьей клеткой».
- 2) ДАЗО2-17-44-8/10У1, служащий приводом дутьевых вентиляторов на ТЭЦ-3 города Иваново. Этот двигатель имеет одну ОР, но является двухскоростным (4 пары полюсов на первой скорости и 5 пар полюсов на второй).

Основные паспортные данные моделируемых АД представлены в таблице 3.1. Параметры для моделирования были получены на упомянутых ранее электрических станциях из технической документации и непосредственного измерения геометрических размеров. В качестве примера на рис. 3.1 приведена документация, по которой производилось моделирование АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1.

Таблица 3.1. Параметры исследуемых АД

Тип двигателя	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, кВт	Напряжение, кВ
ДАМСО-15-12-8	4	740	570	6
ДАЗО-17-44-8/10У1	4/5	741/594	630/320	6

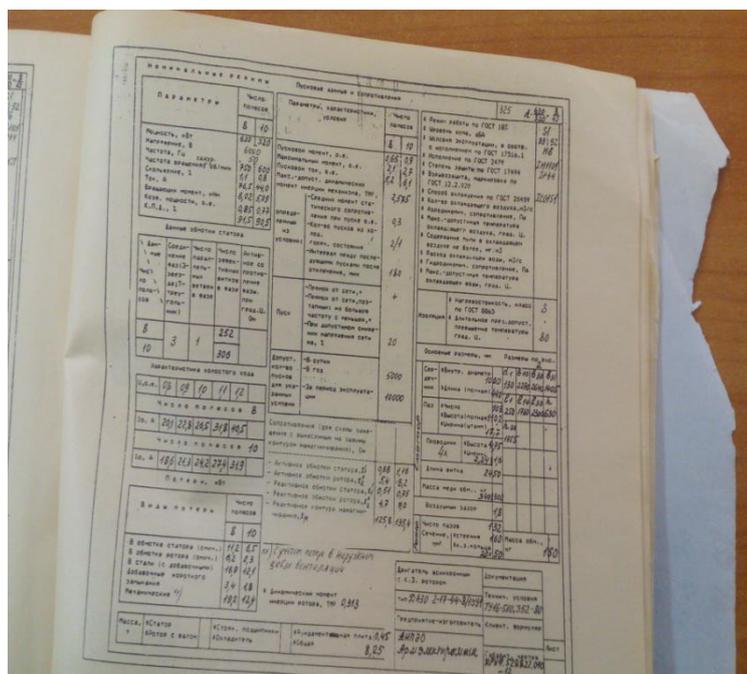
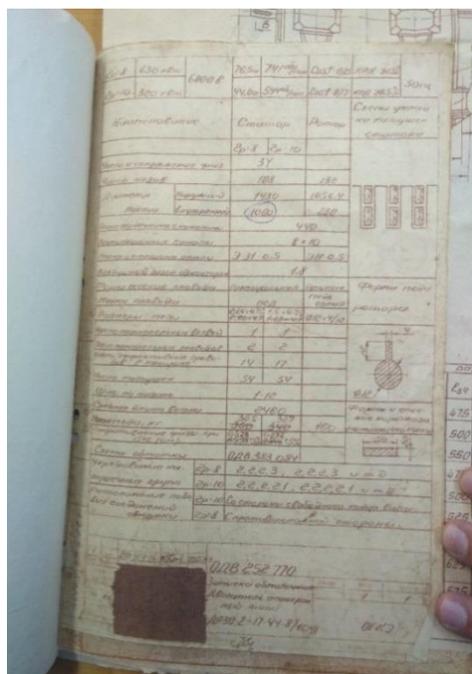


Рис. 3.1. Документация, используемая при моделировании АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1

Модели двигателей выполнены в программном комплексе Ansys в программе Maxwell 2D. Расчет ВМП осуществляется на основе метода конечных элементов. Подробно описание принципов построения и расчета математических моделей представлены в [98]. Для возможности оценки правильности построения спектра записывались также сигналы скорости вращения и тока статора одной из

фаз АД. Построенные модели АД ДАМСО-15-12-8 и ДАЗО2-17-44-8/10У1 приведены на рис. 3.2 и 3.3 соответственно.

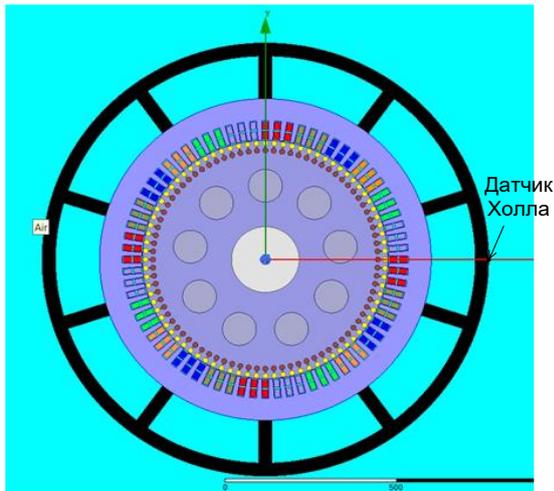


Рис. 3.2. Модель АД типа ДАМСО-15-12-8

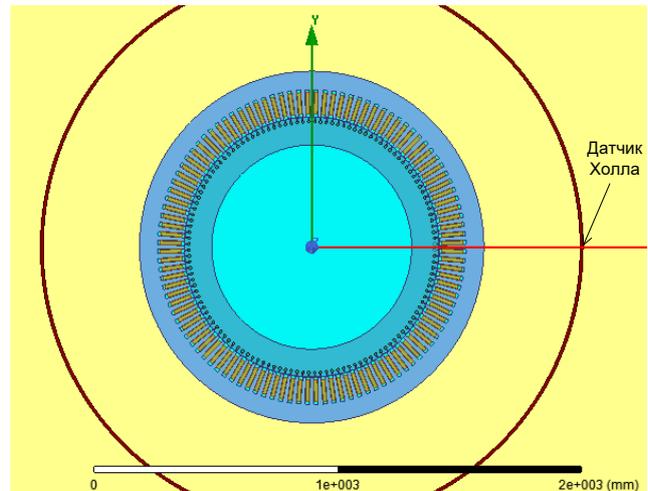


Рис. 3.3. Модель АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1

Для проверки корректности разработанных моделей производилось сравнение ряда режимных параметров АД, полученных в результате расчета на математической модели, с паспортными данными самого электродвигателя. В качестве примера результаты сравнения параметров двигателя ДАЗО2-17-44-8/10У1 представлены в таблице 3.2. Сравнение показало, что режимные параметры модели довольно точно совпадают с паспортными данными, что позволяет говорить о корректности модели. Аналогичные результаты были получены и для второй модели АД.

Следует отметить, что несмотря на довольно точное совпадение результатов, представленных в таблице 3.2, точное совпадение гармонического состава сигнала ВМП является сложной задачей, потому что моделирование статора, корпуса и системы охлаждения высоковольтных АД является сложной задачей, от которой непосредственно зависят конечные результаты. Поэтому при сравнении сигналов ВМП на модели и на реальном АД можно ожидать значительно большую погрешность, чем при сравнении сигнала тока статора.

Как было сказано в предыдущем разделе, для оценки возможности проведения контроля двигателей необходимо произвести расчеты на 3 моделях каждого двигателя – на исправном АД (без оборванных стержней и ДЭ), на АД с ДЭ без обрывов стержней (величина ДЭ принималась равной 20% от величины

воздушного зазора) и на АД с оборванным стержнем ОР без ДЭ. Для АД типа ДАМСО-15-12-8 осуществлен обрыв стержня пусковой (наружной) ОР. Соответственно, в первом случае на математической модели в сигнале ВМП не должно проявляться гармонических составляющих кроме кратных 50 Гц, во втором случае должны проявляться лишь гармонические составляющие ДЭ первых порядков, в третьем – гармонические составляющие от ФОР первых порядков. В сигнале же тока статора при наличии обрыва должна проявляться гармоника от ФОР р-, а в остальных спектрах должны быть только гармоники, кратные 50 Гц. Запись сигнала осуществлялась каждые 0,001 с (то есть частота дискретизации составляла 1000 Гц) для двигателя типа ДАМСО-15-12-8 и каждые 0,0006 с для двигателя типа ДАЗО-17-44-8/10У1. Большее значение частоты дискретизации для второго АД связано с тем, что при более низких значениях спектр существенно искажается из-за больших амплитуд высокочастотных составляющих АД (а именно, зубцовых гармоник АД).

Таблица 3.2. Сравнение режимных параметров на математической модели в RМхprt с паспортными данными АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 для 5 пар полюсов

Наименование параметра	Результаты расчета на математической модели	Паспортные данные
Номинальная мощность на валу, кВт	319,972	320,0
Номинальная электрическая мощность, кВт	349,399	353,6
Фазный ток статора в номинальном режиме, А	43,93	44,0
Коэффициент мощности в номинальном режиме, о.е.	0,761	0,77
КПД двигателя, %	91,58	90,5
Номинальная скорость вращения, об/мин	593,3	594,0
Сопротивление обмотки статора, Ом	0,877 (при 20°C)	0,852 (при 15°C)
Фазный ток статора в режиме холостого хода, А	22,948	24,2
Фазный ток статора в пусковом режиме, А	216,064	268,4
Вращающий момент в номинальном режиме, кН·м	5,15	5,09
Потери в обмотке статора (омические), кВт	6,18	6,5

3.3. Анализ спектров сигналов внешнего магнитного поля на математических моделях высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд

ЧВС ВМП на математических моделях двигателей ДАМСО-15-12-8 и ДАЗО2-17-44-8/10У1 были построены с помощью разработанного ранее алгоритма (представленного в предыдущей главе). Первоначально для оценки возможности проведения контроля была произведена оценка длительности пуска АД с моментом сопротивления, эквивалентным соответствующим механизмам тягодутьевого тракта, а для проверки корректности полученных спектров был также построен график изменения скорости вращения двигателя от времени (в качестве примера на рис. 3.4 и 3.5 приведены графики изменения скорости вращения двигателя от времени для исправного АД). Из графика видно, что время пуска двигателя ДАМСО-15-12-8 составляет около 10 сек, а ДАЗО2-17-44-8/10У1 – около 15 сек, что является достаточным значением для проведения контроля.

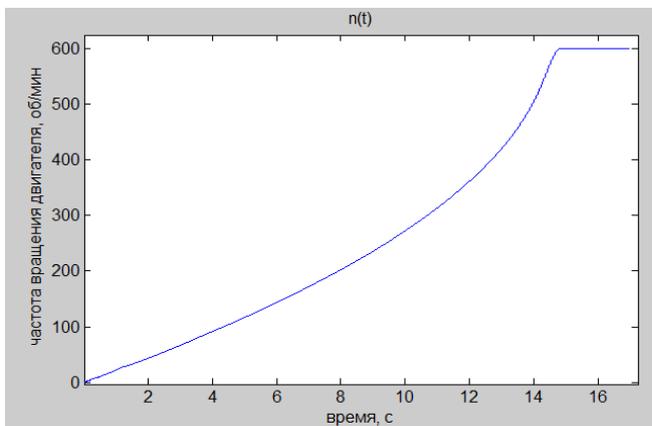


Рис. 3.4. Изменение скорости вращения математической модели ДАМСО-15-12-8 при пуске

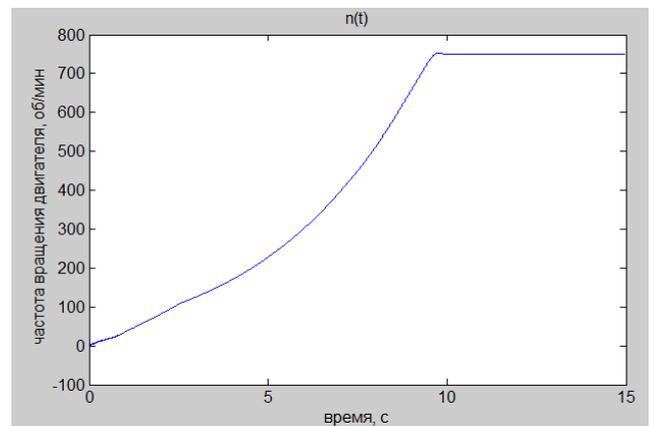


Рис. 3.5. Изменение скорости вращения математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 при пуске

В качестве регистрируемого сигнала на моделях АД выступала радиальная составляющая индукции ВМП. Регистрация осуществлялась в точках на корпусе АД, обозначенных на рис. 3.2 и 3.3 «Датчик Холла». Регистрация сигналов внутреннего магнитного поля на высоковольтных двигателях не осуществлялась,

так как запись подобных сигналов на реальных АД не представляется возможной. Это связано с тем, что для измерения поля внутри воздушного зазора требуется установка датчика внутри АД. При этом при пуске двигателя сам датчик также может послужить причиной аварии. Кроме того, в спектрах подобных АД будут отчетливо проявляться зубцовые гармонические составляющие, поэтому для регистрации этих сигналов потребуется очень большой объем вычислений (так как требуется очень высокая частота дискретизации для корректного отображения спектра).

Полученные спектры приведены на рис. 3.6-3.8 для модели двигателя ДАМСО-15-12-8 и на рис. 3.9-3.11 для модели двигателя ДАЗО2-17-44-8/10У1. Указанные справа на шкале числа показывают пределы амплитуд, отображаемых в спектрах сигналов. Если значения амплитуд превышают верхний указанный предел, то они отображаются в спектре ярко красным цветом, если меньше нижнего предела – темно-синим.

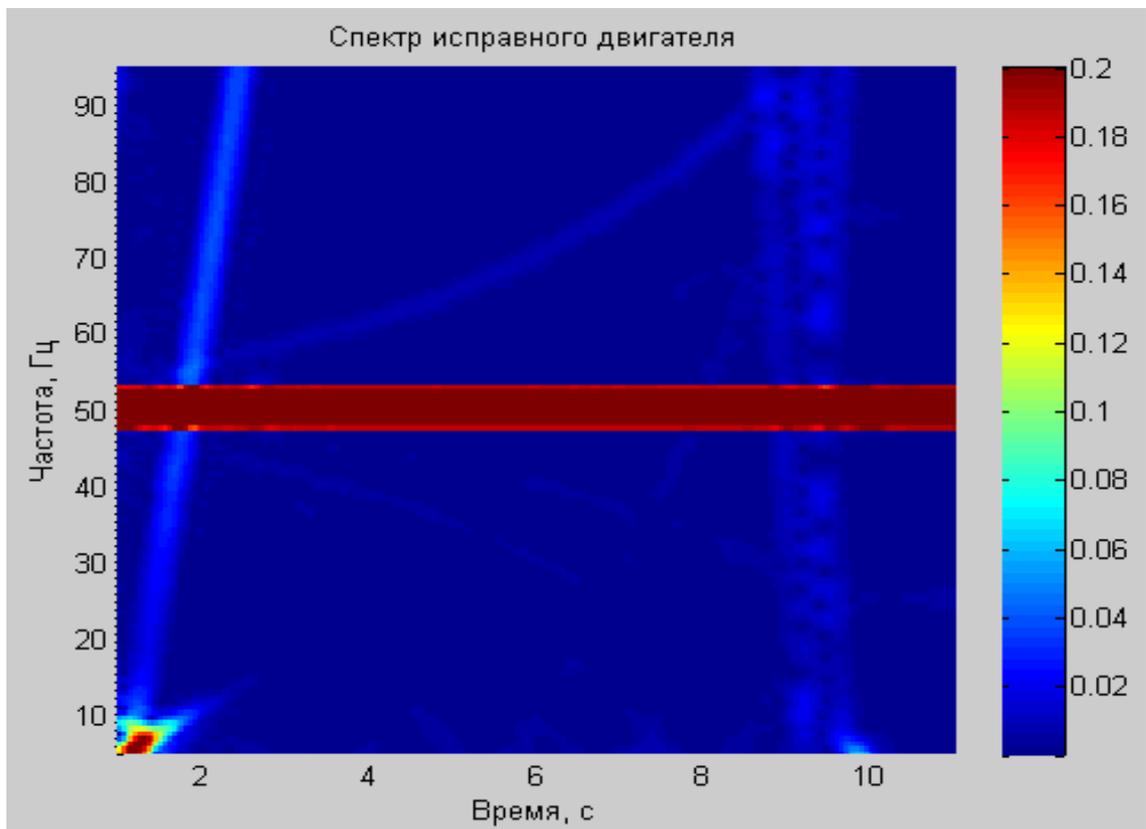


Рис. 3.6. ЧВС сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 с исправной ОР

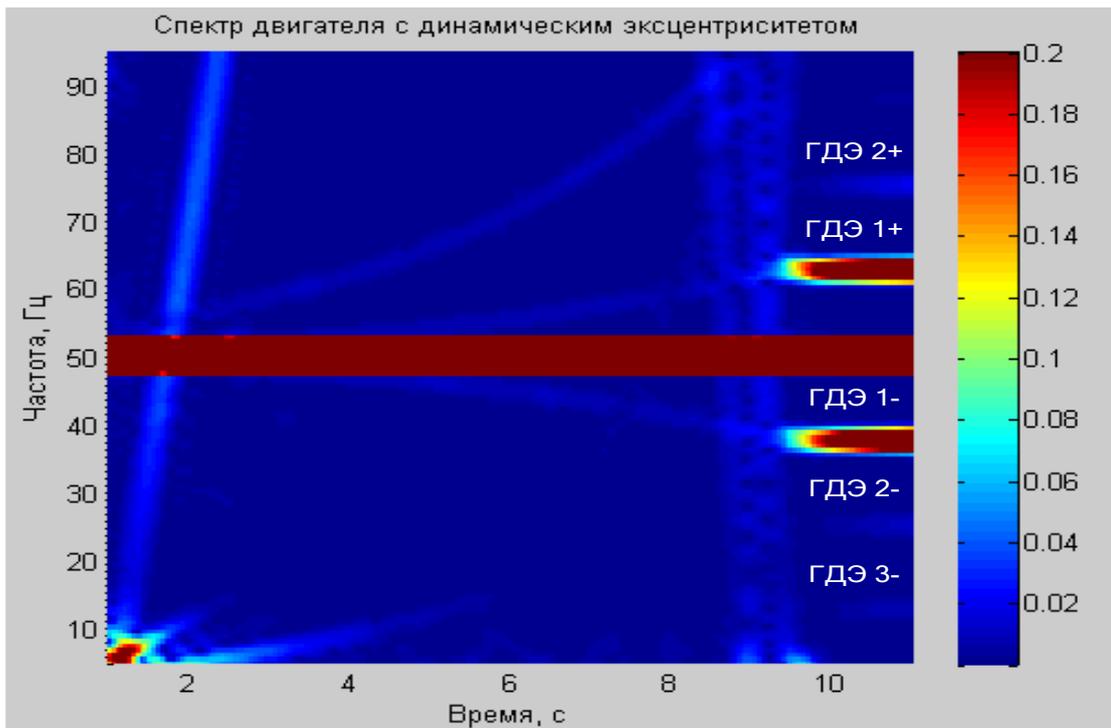


Рис. 3.7. ЧВС сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 с ДЭ (20% от величины воздушного зазора)

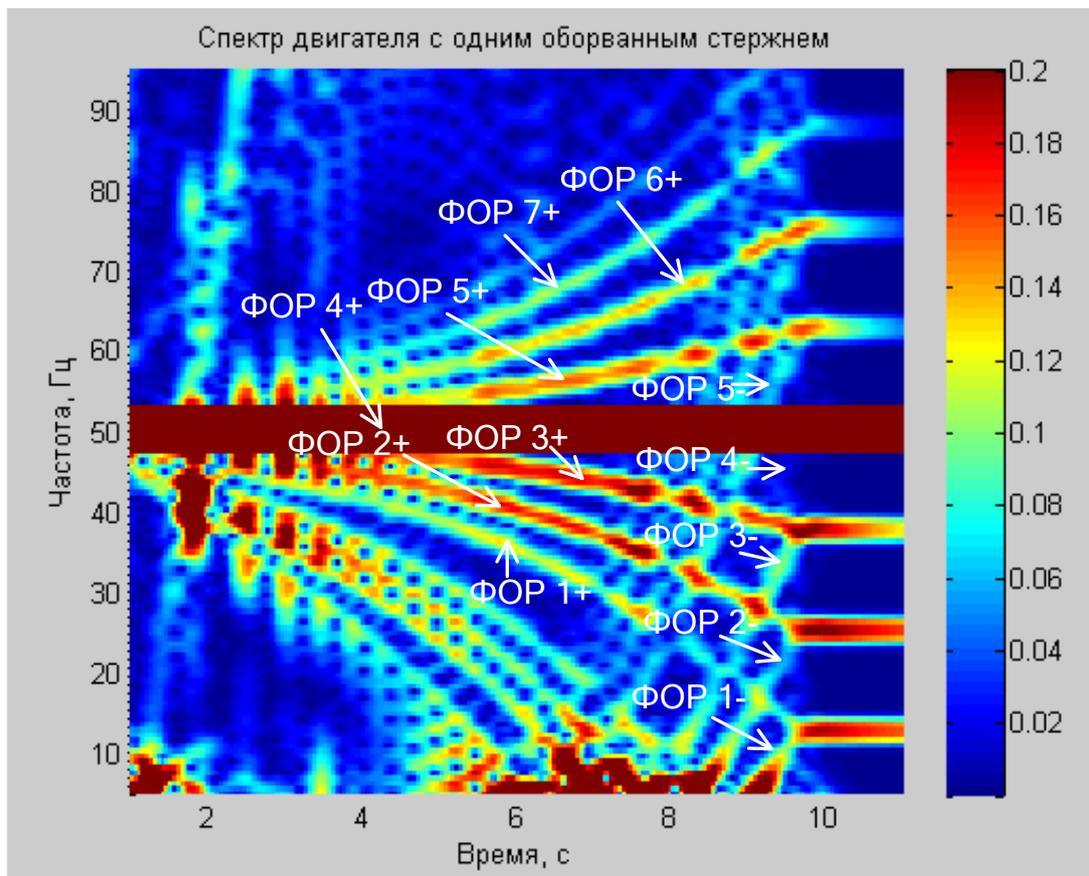


Рис. 3.8. ЧВС сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 с одним оборванным стержнем короткозамкнутой ОР

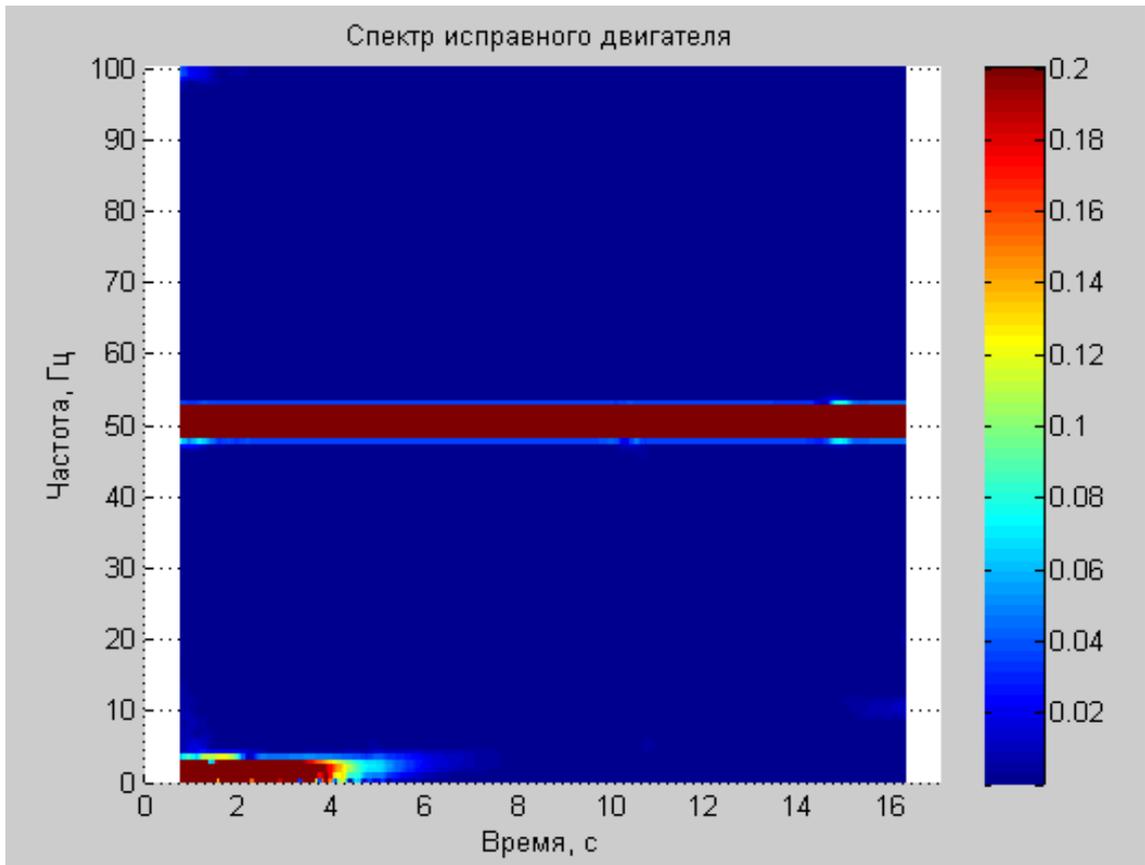


Рис. 3.9. ЧВС сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с исправной ОР

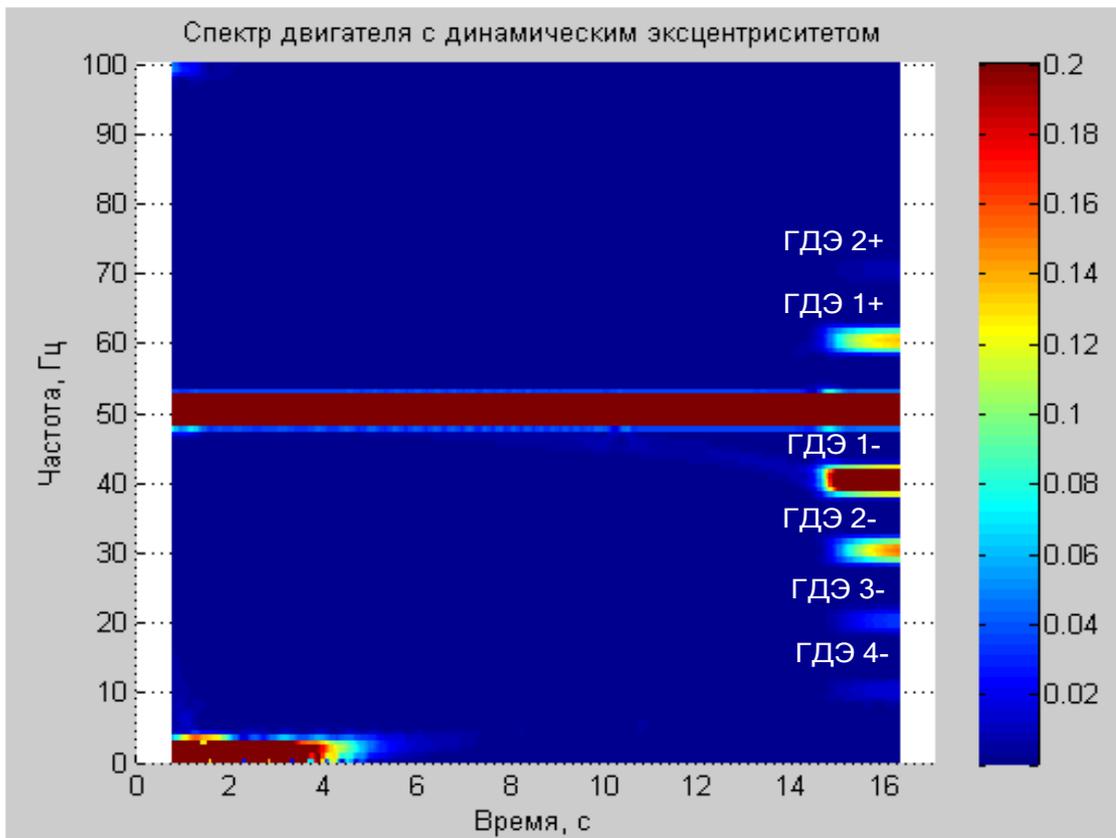


Рис. 3.10. ЧВС сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с ДЭ (20% от величины воздушного зазора)

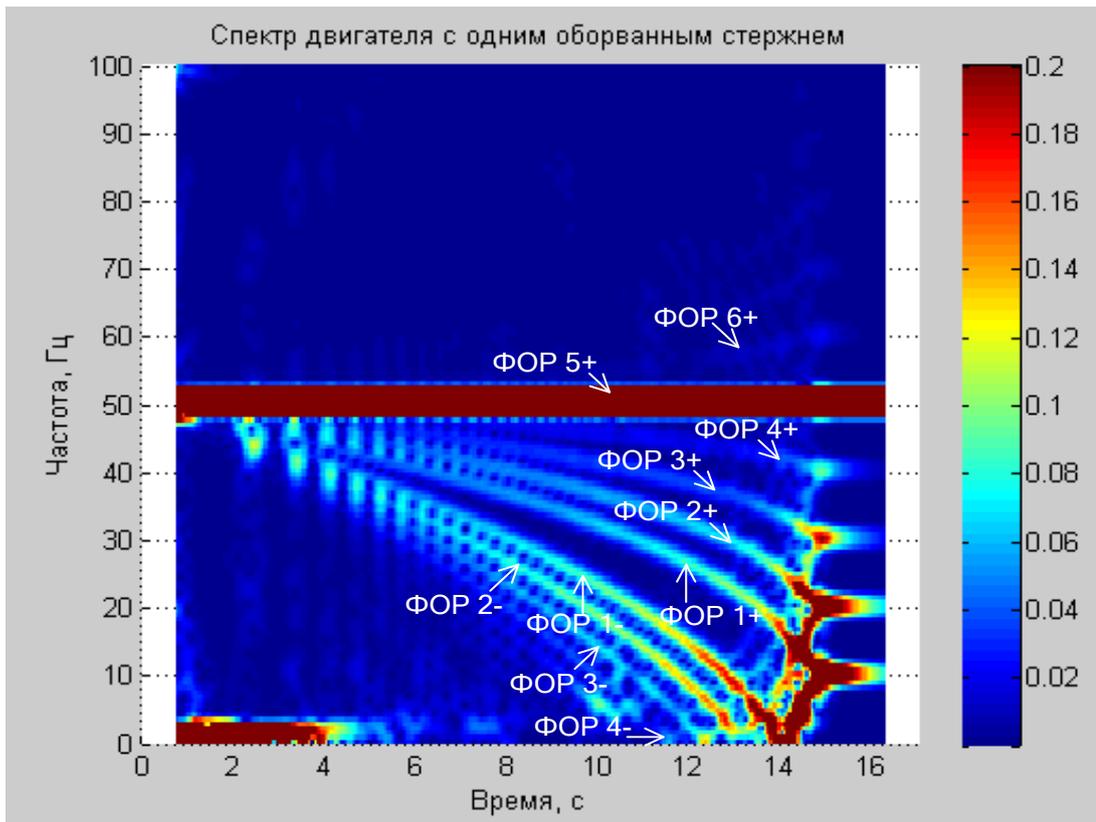


Рис. 3.11. ЧВС сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем короткозамкнутой ОР

Из представленных спектров можно сделать следующие выводы. Видно, что на рис. 3.6 и 3.9, на которых приведены спектры двигателей с исправной обмоткой ротора без ДЭ, в спектре АД практически не проявляются гармонические составляющие за исключением гармоники 50 Гц. При возникновении ДЭ (рис. 3.7 и 3.10) в спектре проявляются лишь гармонические составляющие ДЭ первого порядка, причем их амплитуды при пуске значительно ниже, чем в установившемся режиме. Поэтому полученные результаты показывают, что ДЭ практически не оказывает влияния на гармоники от ФОР при пуске, поэтому в ходе анализа ЧВС ВМП можно учитывать все гармоники от ФОР, кроме 50 Гц. Наконец, при обрыве стержней ОР АД (рис. 3.8 и 3.11) в спектре отчетливо проявляется большинство гармоник от ФОР, имеющих при пуске довольно высокие амплитуды. При этом отчетливо проявляются как гармоники от ФОР на верхних боковых частотах, так и отраженные гармоники от ФОР, что подтверждает наличие обрыва стержня. При этом амплитуды гармоник

от ФОР, как видно из представленных спектров, при обрыве стержня на несколько порядков превышают амплитуды гармоник от ФОР без наличия дефектов.

Для проверки корректности полученных спектров были определены расчетные значения частот гармоник ДЭ первого порядка, а также расчетные значения частот гармоник от ФОР первых пяти порядков для исследуемых моделей АД. Для этих целей используются полученные ранее графики изменения скорости вращения двигателя от времени (рис. 3.4 и 3.5). Зная скорость вращения двигателя, можно определить и скольжение двигателя по выражению:

$$s = \frac{n_c - n}{n_c},$$

где n_c – синхронная скорость АД, об/мин, $n_c = \frac{3000}{p}$;

n – скорость вращения АД в момент времени t , об/мин.

При известном скольжении АД легко могут быть определены и значения частот гармоник от ФОР и ДЭ по выражениям (2.3), (2.4) и (2.7), (2.8) соответственно. В результате были построены расчетные зависимости изменения частот гармоник от ФОР и ДЭ первых порядков, которые должны иметь высокие амплитуды при наличии дефектов, с течением времени для всех моделей АД, которые приведены на рис. 3.12-3.15. Видно, что расчетные значения соответствуют полученным спектрам, построенным с помощью разработанного алгоритма (рис. 3.6-3.11), что подтверждает корректность полученных ранее спектров.

Для оценки эффективности (чувствительности) диагностирования в пусковом режиме была произведена более точная оценка и сравнение амплитуд сигнала в различные моменты пуска и в установившемся режиме. Для сравнения были выделены по 3 момента времени для моделей двигателей с 1 оборванным стержнем и при наличии ДЭ: первый приблизительно в середине пускового режима, второй – близкий к установившемуся режиму, третий – в установившемся режиме работы.

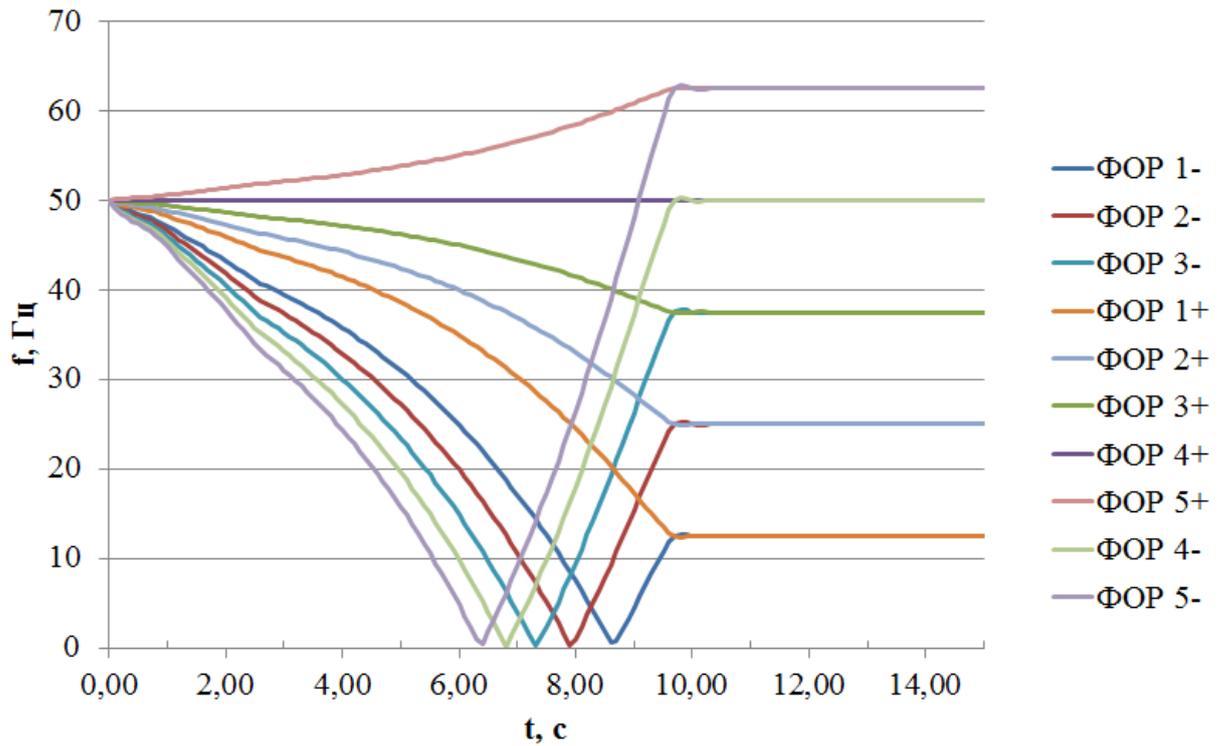


Рис. 3.12. Расчетные значения частот гармоник от ФОР в спектре ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 при пуске

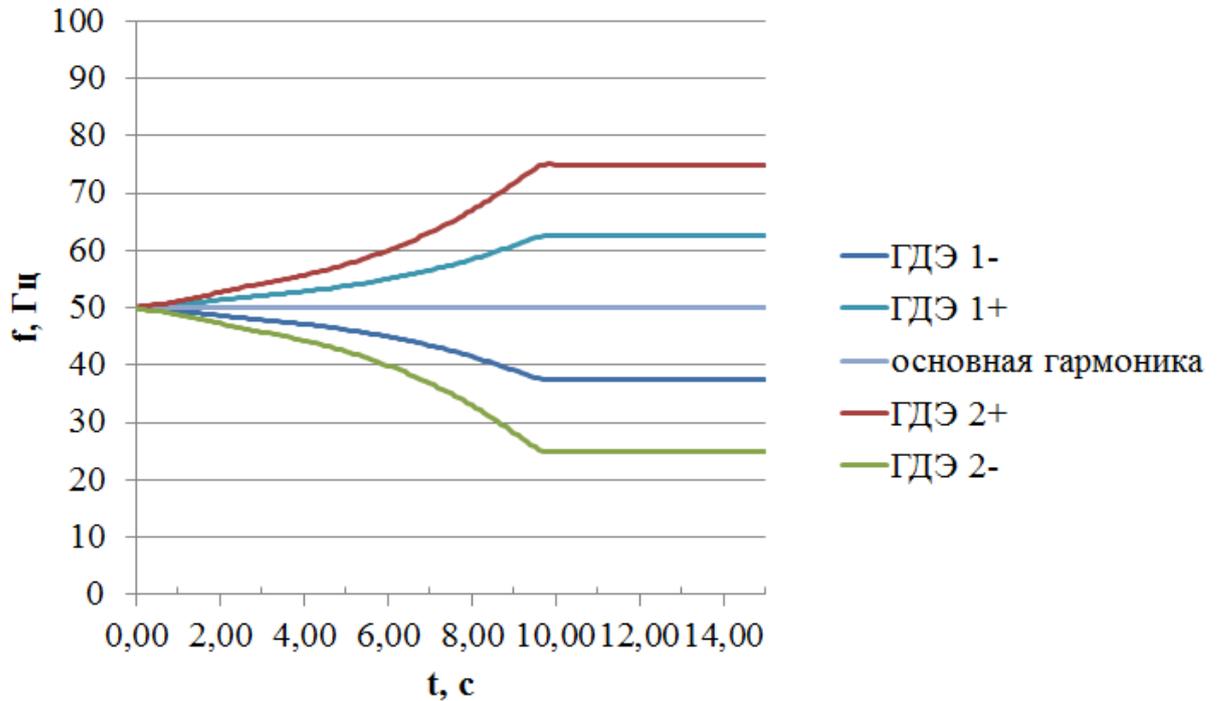


Рис. 3.13. Расчетные значения частот гармоник ДЭ в спектре ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 при пуске

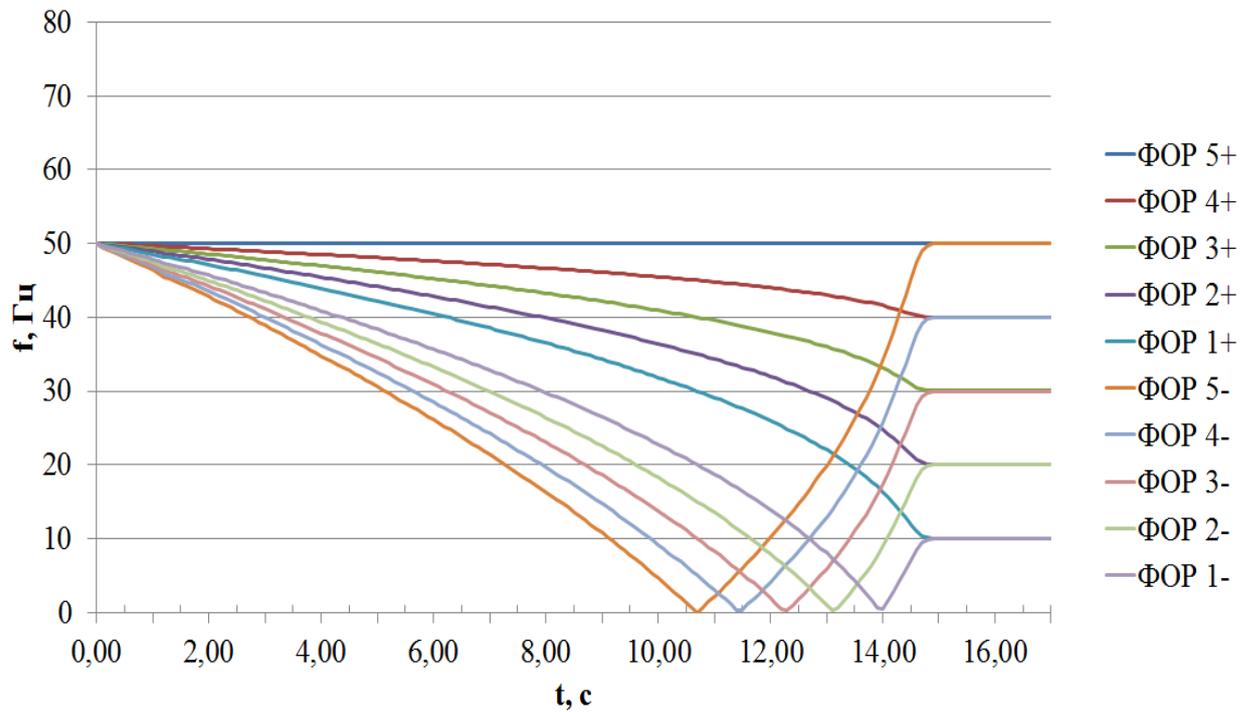


Рис. 3.14. Расчетные значения частот гармоник от ФОР в спектре ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 при пуске

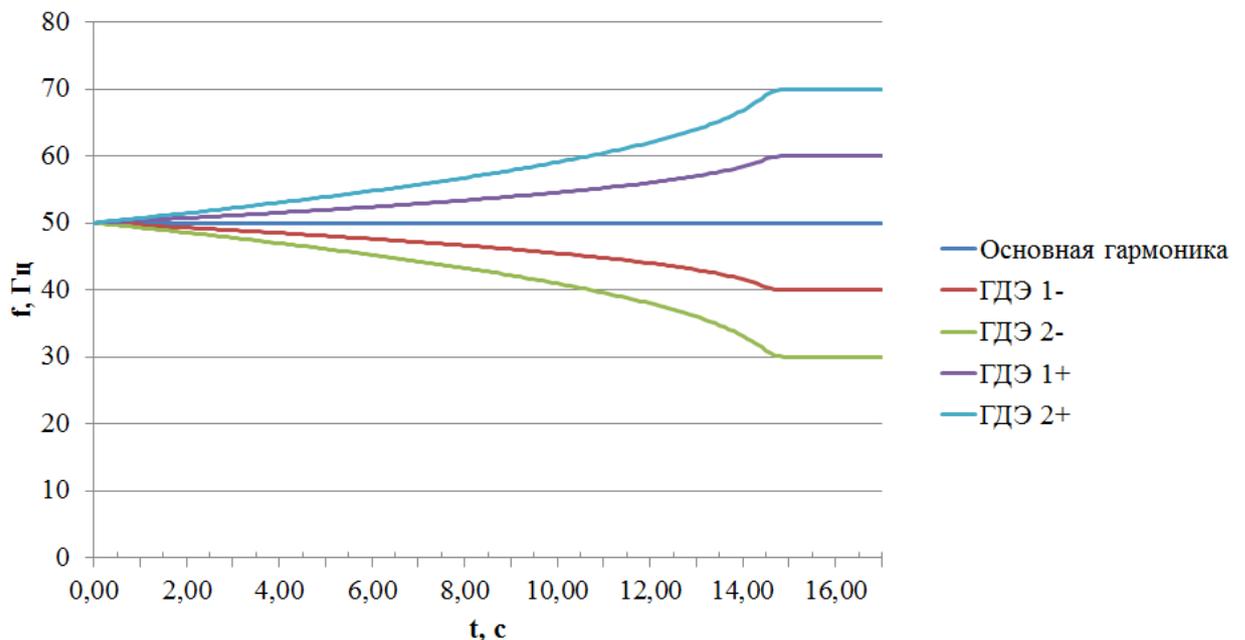


Рис. 3.15. Расчетные значения частот гармоник ДЭ в спектре ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 при пуске

Амплитудные спектры сигнала ВМП приведены на рис. 3.16 для математической модели ДАМСО-15-12-8 с ДЭ, на рис. 3.17 – для математической модели ДАМСО-15-12-8 с обрывом стержня короткозамкнутой ОР, на рис. 3.18 для математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 с ДЭ, а на рис. 3.19 – для

математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем ОР. Сопоставление рисунков показало, что амплитуды гармонических составляющих ДЭ в несколько раз меньше в пусковом режиме (например, амплитуда гармоник ДЭ первого порядка составляет 0,015 мкТл по сравнению с 0,31-0,42 мкТл в установившемся режиме для двигателя типа ДАМСО-15-12-8), а амплитуды гармонических составляющих от ФОР, наоборот, значительно выше в пусковом режиме (например, для АД типа ДАМСО-15-12-8 составляет в среднем около 0,015-0,02 мкТл, а в области низких частот достигает 0,06 мкТл, в то время как в установившемся режиме она не превышает 0,01 мкТл, даже с учетом того, что в установившемся режиме гармоники от ФОР на верхних и нижних боковых частотах сливаются в спектре). Это обусловлено тем, что ток при пуске АД значительно выше, чем в установившемся режиме (график изменения тока статора от времени при пуске математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 приведен на рис. 3.20).

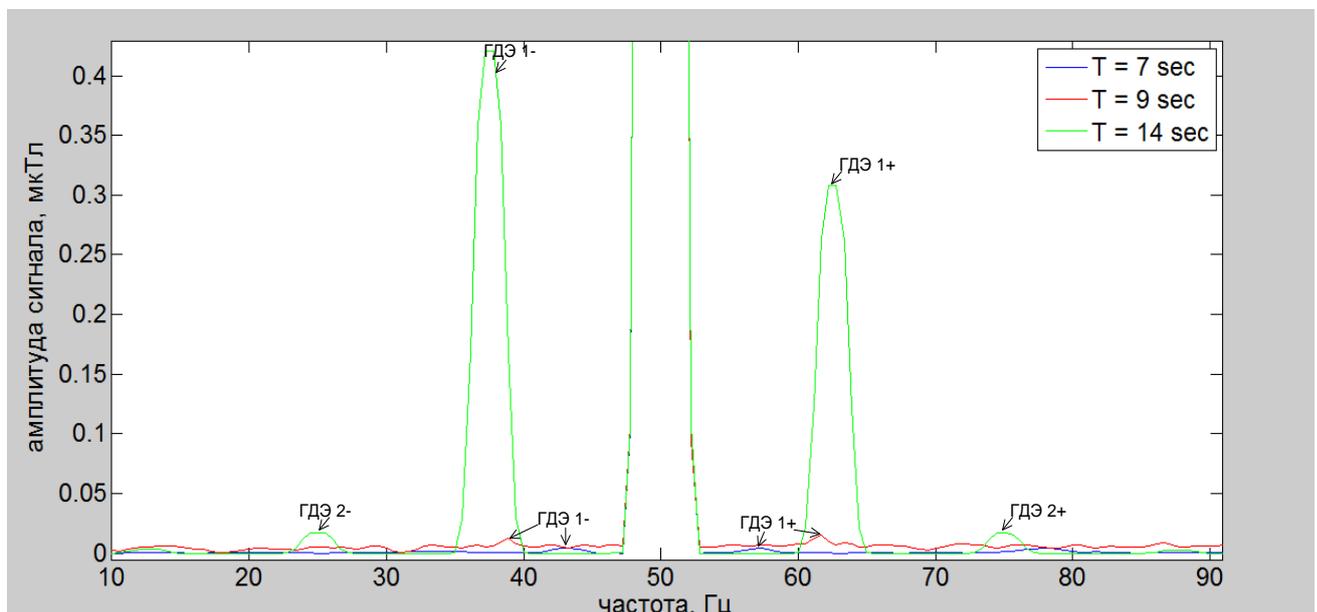


Рис. 3.16. Амплитудные спектры сигнала ВМП на модели ДАМСО-15-12-8 с ДЭ (20%) в моменты времени 7, 9 и 14 сек

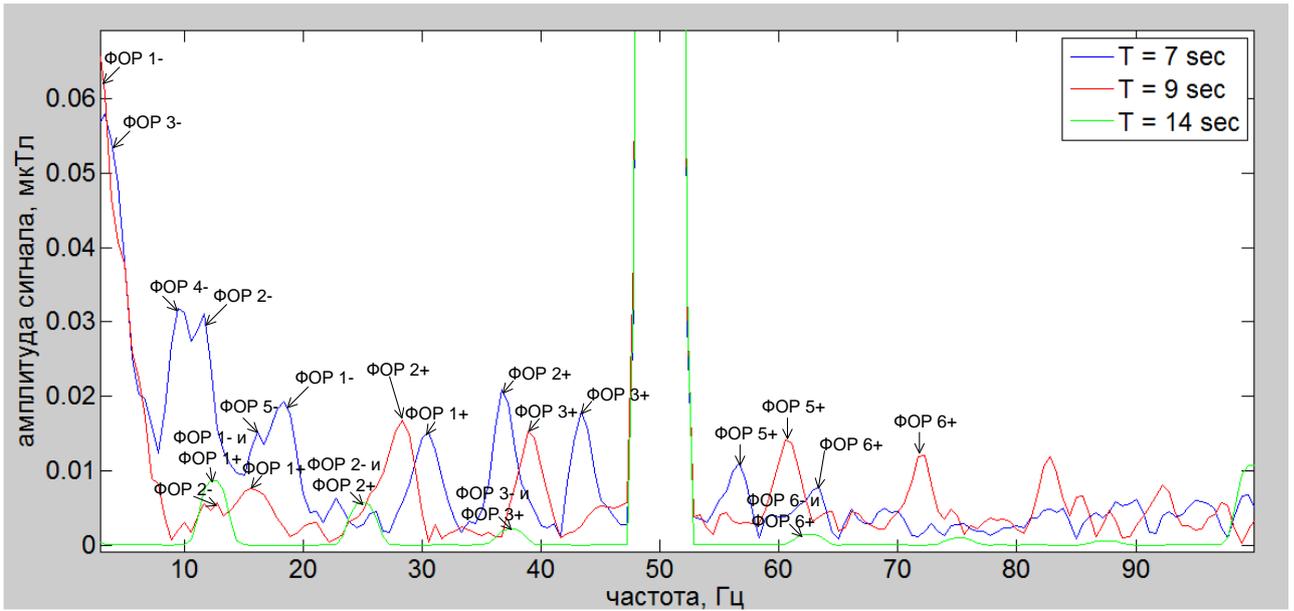


Рис. 3.17. Амплитудные спектры сигнала ВМП на модели ДАМСО-15-12-8 с 1 оборванным стержнем в моменты времени 7, 9 и 14 сек

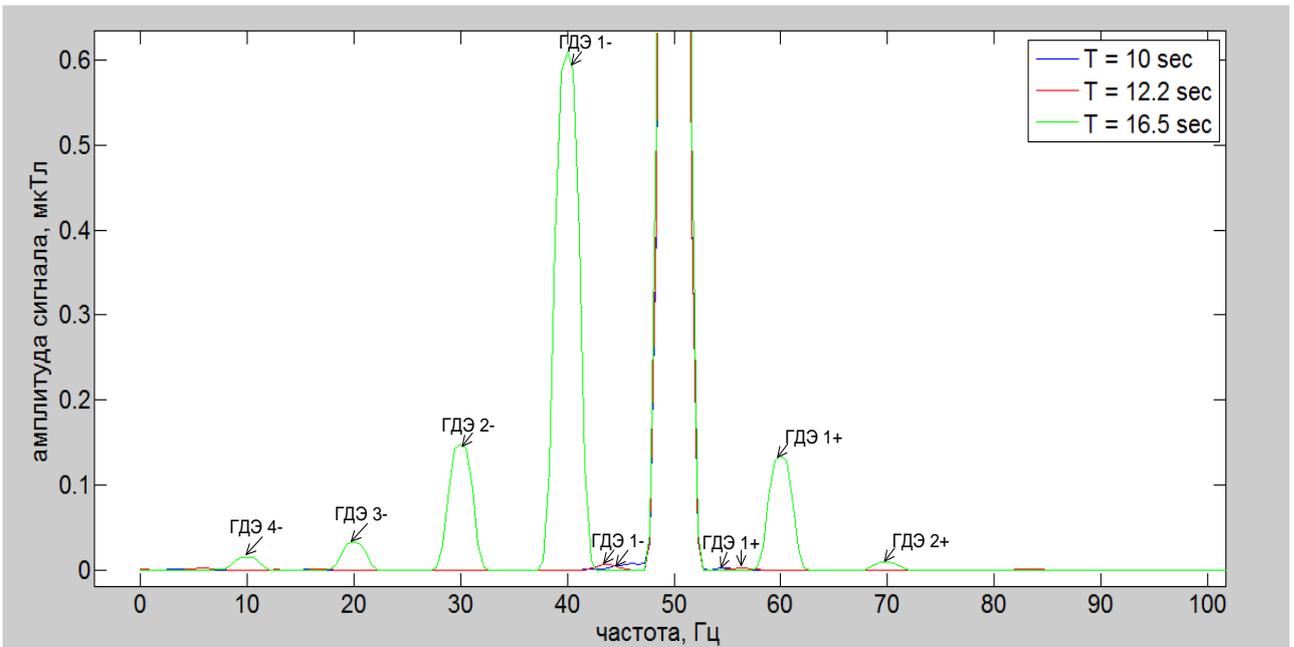


Рис. 3.18. Амплитудные спектры сигнала ВМП на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с ДЭ (20%) в моменты времени 10, 12.2 и 16.4 сек

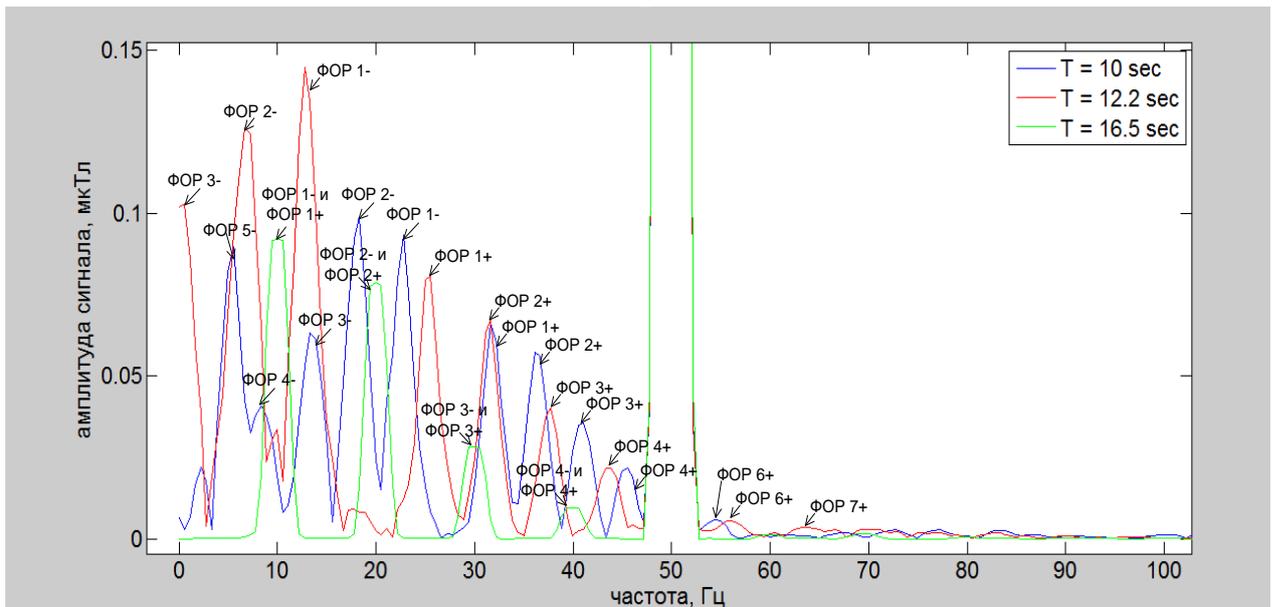


Рис. 3.19. Амплитудные спектры сигнала ВМП на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с 1 оборванным стержнем в моменты времени 10, 12.2 и 16.4 сек

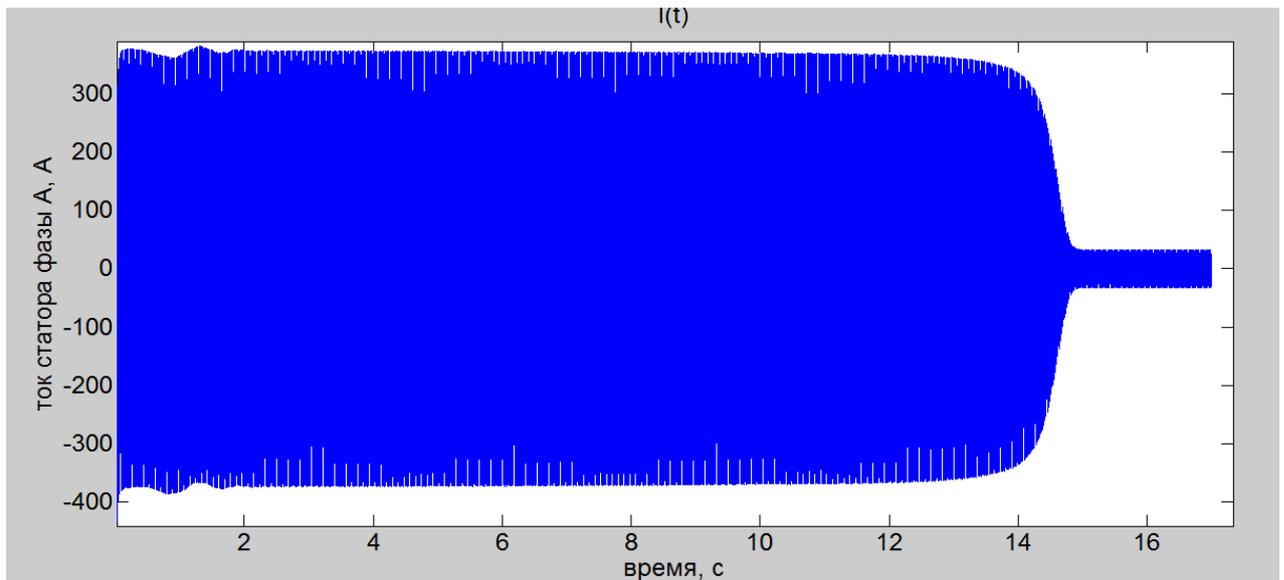


Рис. 3.20. Изменение тока статора при пуске ДАЗО-17-44-8/10У1

Таким образом, на математической модели доказано, что сигнал радиальной составляющей индукции ВМП в пусковом режиме для АД с длительным пуском несет в себе диагностическую информацию, которая может быть использована для контроля их технического состояния. В качестве диагностического признака наличия неисправности выступает наличие отчетливо выраженных гармоник от ФОР в области частот от 0 до 100 Гц, в качестве же исходной информации требуются лишь данные аналого-цифрового преобразователя (АЦП), число пар полюсов АД и приблизительная длительность его пуска.

3.4. Анализ спектров тока статора на математических моделях высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд

После анализа спектров ВМП было выполнено построение и анализ спектров тока статора на разработанных математических моделях. Необходимые для оценки корректности полученных спектров графики изменения скорости вращения АД приведены в разделе 3.3. Полученные спектры тока статора для исправного АД, для АД с ДЭ (20% от величины воздушного зазора) и АД с одним оборванным стержнем ОР приведены на рис. 3.21-3.23 соответственно для двигателя типа ДАМСО-15-12-8 и на рис. 3.24-3.26 соответственно для двигателя типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 (значения токов представлены в А).

Произведем анализ полученных спектров. Из рисунков 3.21, 3.22, 3.24 и 3.25 видно, что в спектрах как исправного АД, так и АД с ДЭ не проявляются выраженные гармонические составляющие, кроме основной гармоники сигнала (50 Гц). Таким образом, подтверждено, что ДЭ практически не оказывает влияния на спектр тока статора высоковольтных АД с длительным пуском и, следовательно, влияние ДЭ на спектр тока статора в дальнейшем можно не рассматривать. С другой стороны, при возникновении обрыва стержня в ЧВС отчетливо проявляется гармоническая составляющая от ФОР р- (ФОР 4- для ДАМСО-15-12-8 с 4 парами полюсов и ФОР 5- для ДАЗО2-17-44-8/10У1 с пуском с 5 парами полюсов), то есть амплитуда этой гармоники при наличии повреждения резко возрастает. Таким образом, наличие в спектре указанной гармонической составляющей позволяет обнаруживать обрыв даже одного стержня короткозамкнутой ОР высоковольтных АД с длительным пуском.

Как и в случае спектров ВМП, для проверки корректности полученных спектров с обрывом стержней ОР были определены расчетные значения частот гармоники от ФОР р- по описанному ранее способу. Расчетные значения частот гармоник от ФОР 4- для модели ДАМСО-15-12-8 приведены на рис. 3.27, а для

модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 – на рис. 3.28. Сопоставление рисунков 3.27 и 3.23, 3.28 и 3.26 подтверждает корректность полученных спектров тока статора.

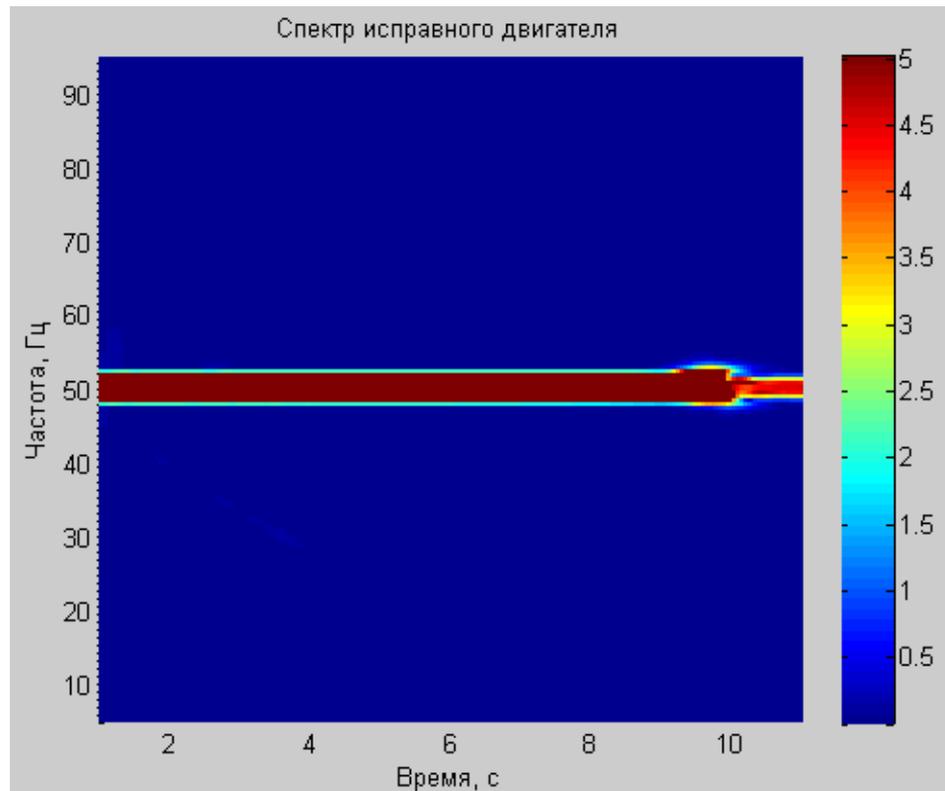


Рис. 3.21. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАМСО-15-12-8 с исправной ОР

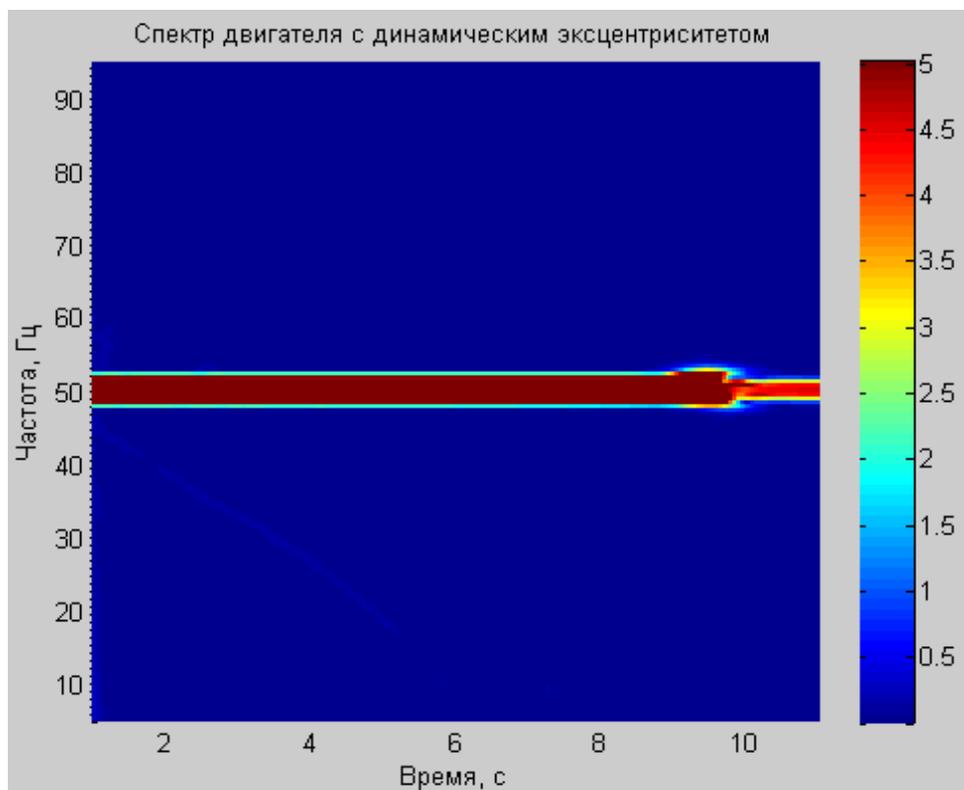


Рис. 3.22. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАМСО-15-12-8 с ДЭ (20% от величины воздушного зазора)

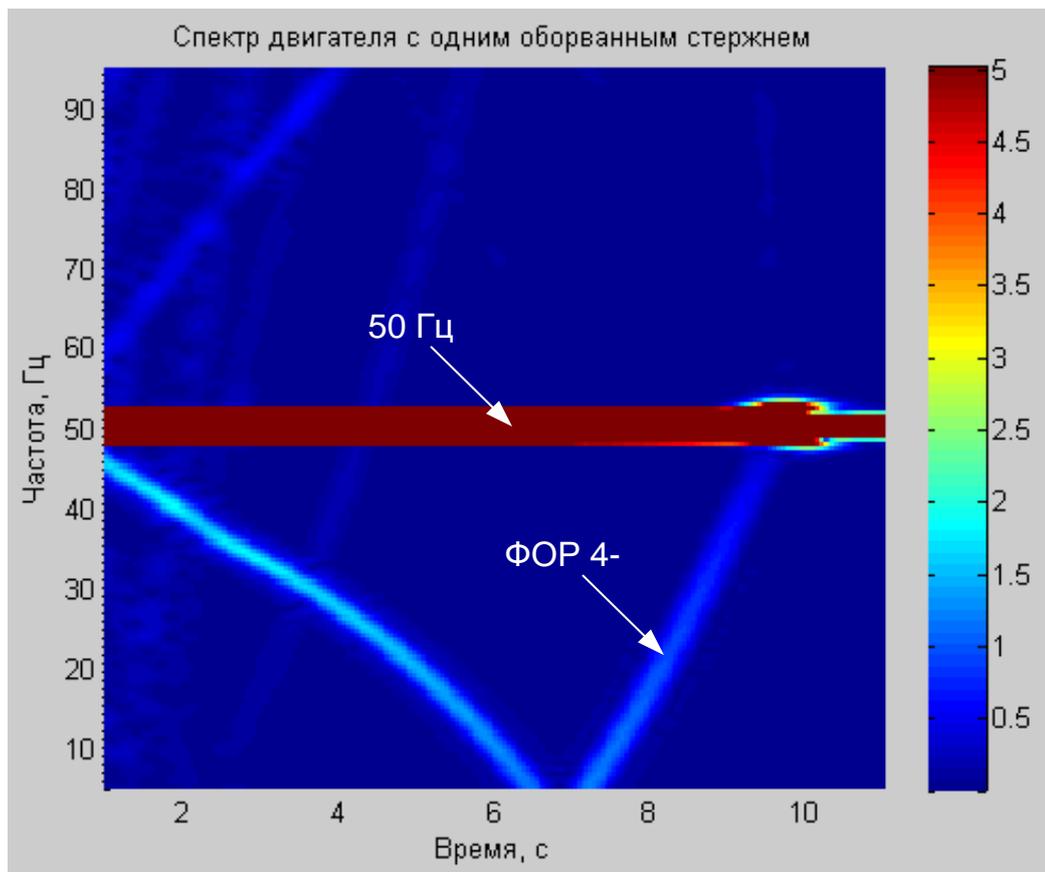


Рис. 3.23. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАМСО-15-12-8 с одним оборванным стержнем короткозамкнутой ОР

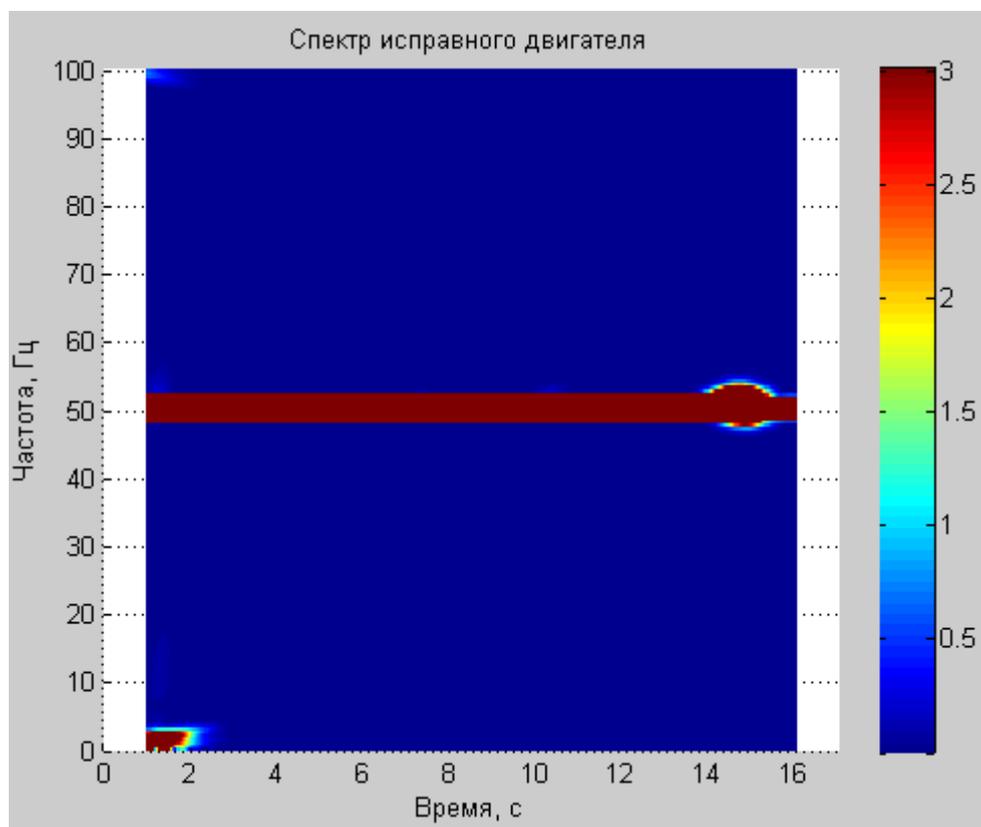


Рис. 3.24. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с исправной ОР

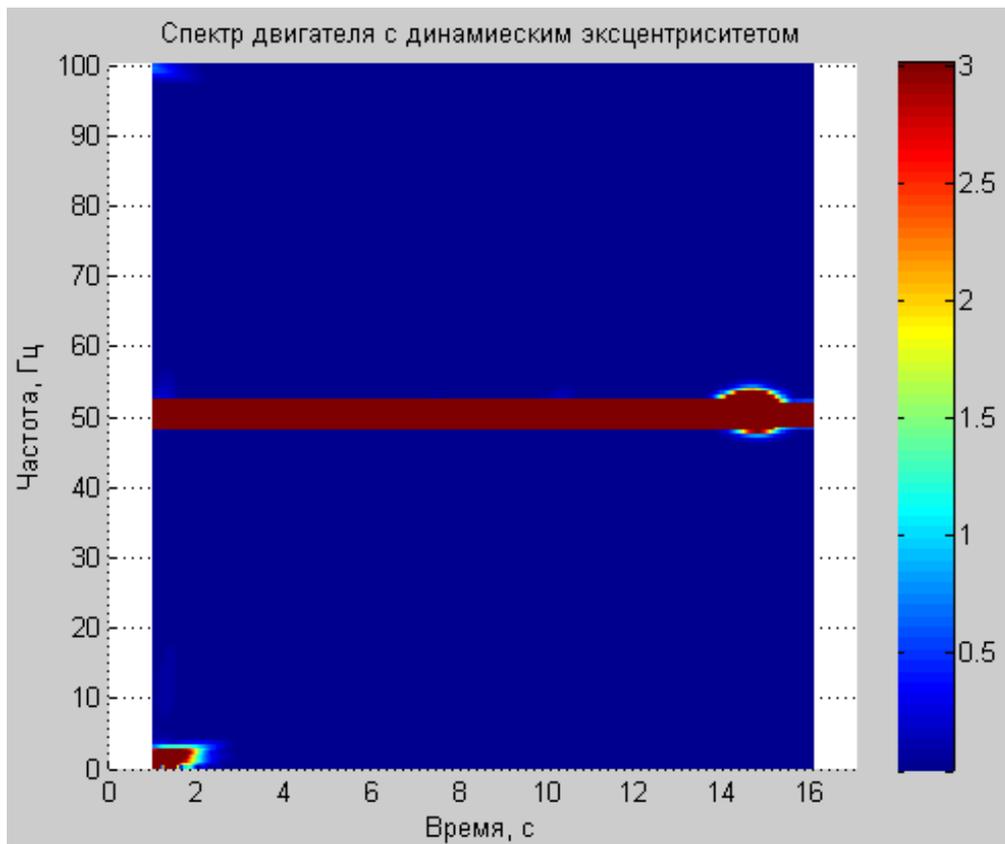


Рис. 3.25. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с ДЭ (20% от величины воздушного зазора)

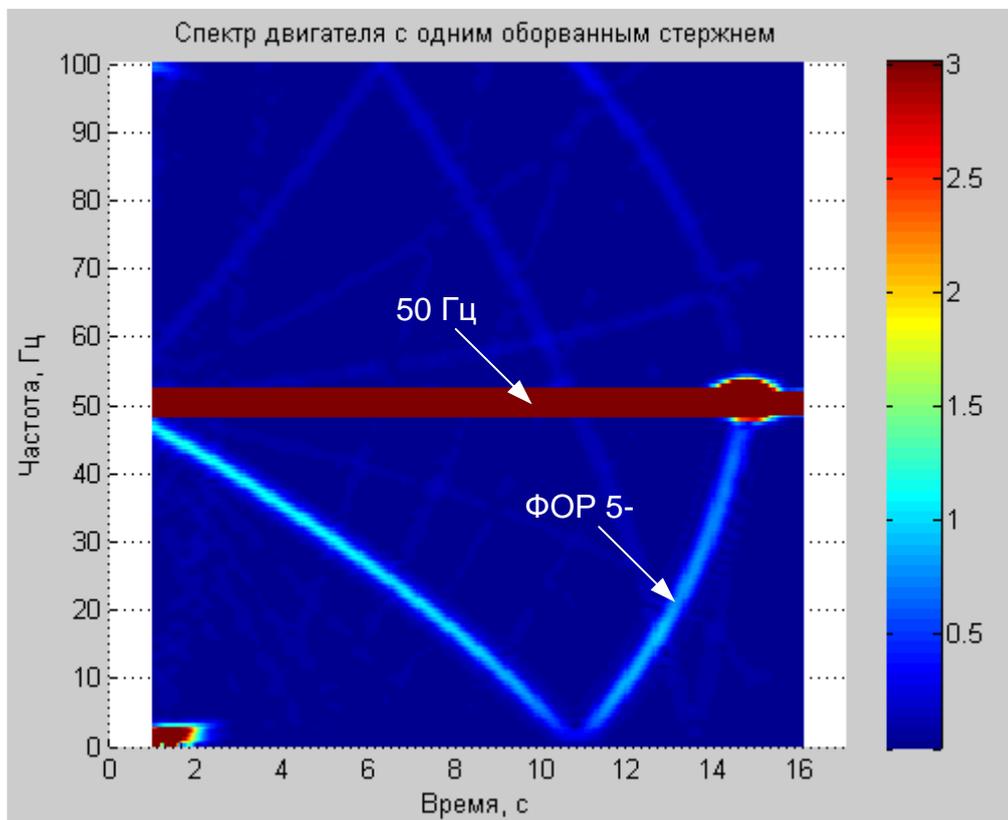


Рис. 3.26. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем короткозамкнутой ОР

Амплитудные спектры сигналов тока статора для рассматриваемых двигателей приведены на рис. 3.29 и 3.30. Видно, что в пусковом режиме амплитуды характерных гармонических составляющих довольно высоки и могут быть легко определены в спектре тока статора. В установившемся режиме работы эти гармоники практически не проявляются, что подтверждает высокую эффективность контроля по току статора именно в пусковых режимах.

Таким образом, на математической модели доказано, что сигнал тока статора в пусковом режиме для АД с длительным пуском также несет в себе диагностическую информацию, которая может быть использована для контроля их технического состояния. В качестве диагностического признака наличия неисправности в сигнале тока статора выступает наличие выраженной гармоники от ФОР р-. В качестве же исходной информации требуются лишь данные АЦП и приблизительная длительность его пуска.

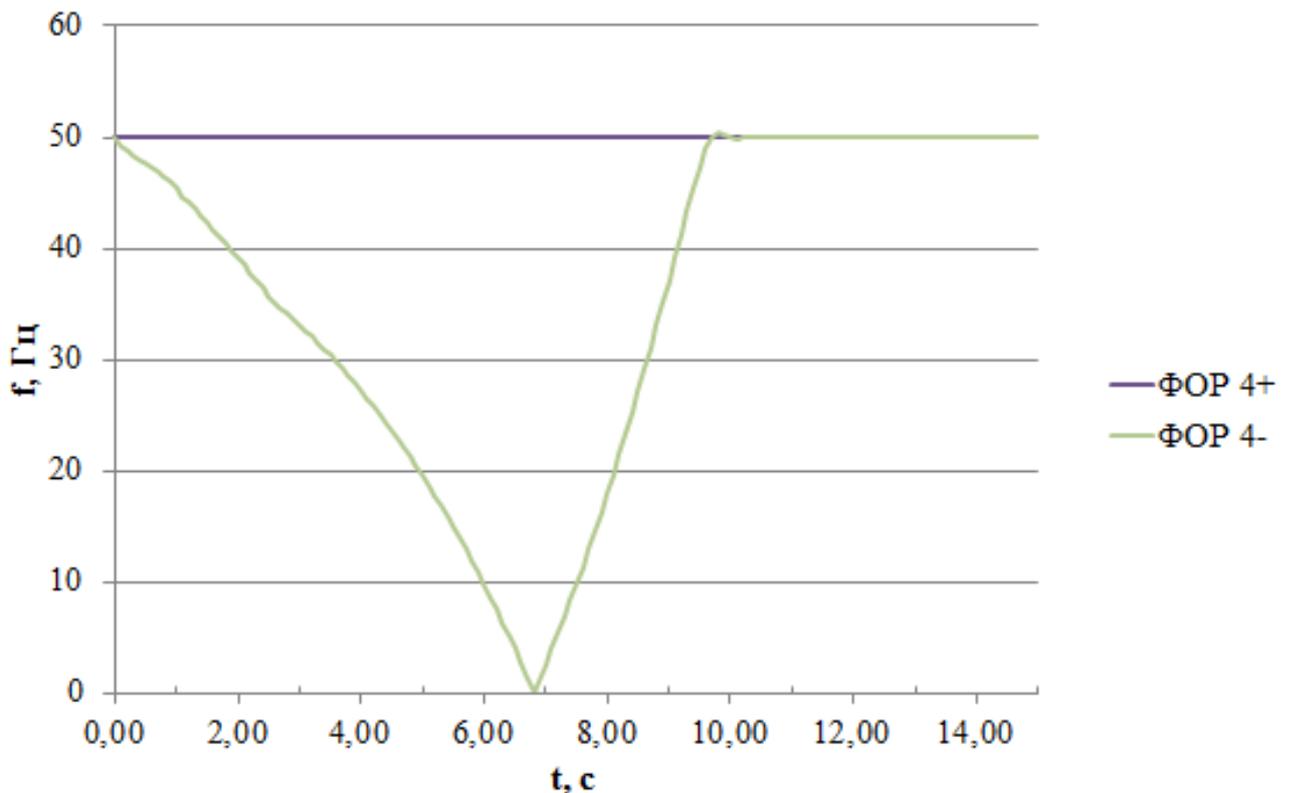


Рис. 3.27. Расчетные значения частот гармоник от ФОР в спектре тока статора на математической модели ДАМСО-15-12-8 при пуске

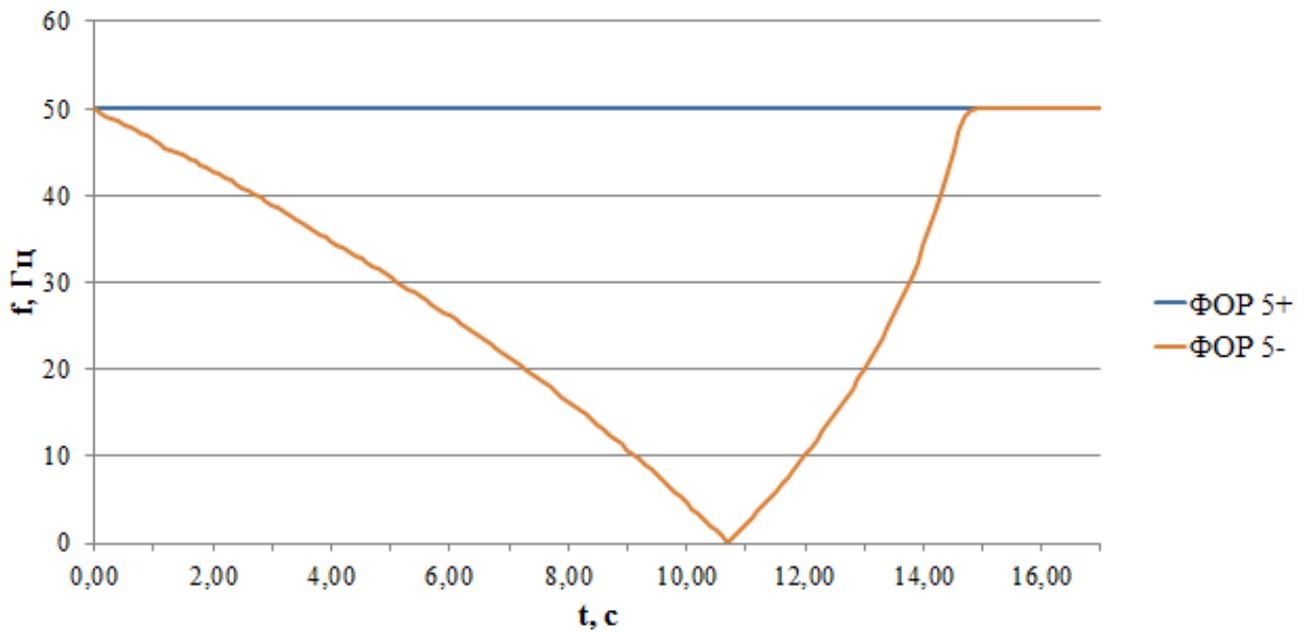


Рис. 3.28. Расчетные значения частот гармоник от ФОР в спектре тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 при пуске

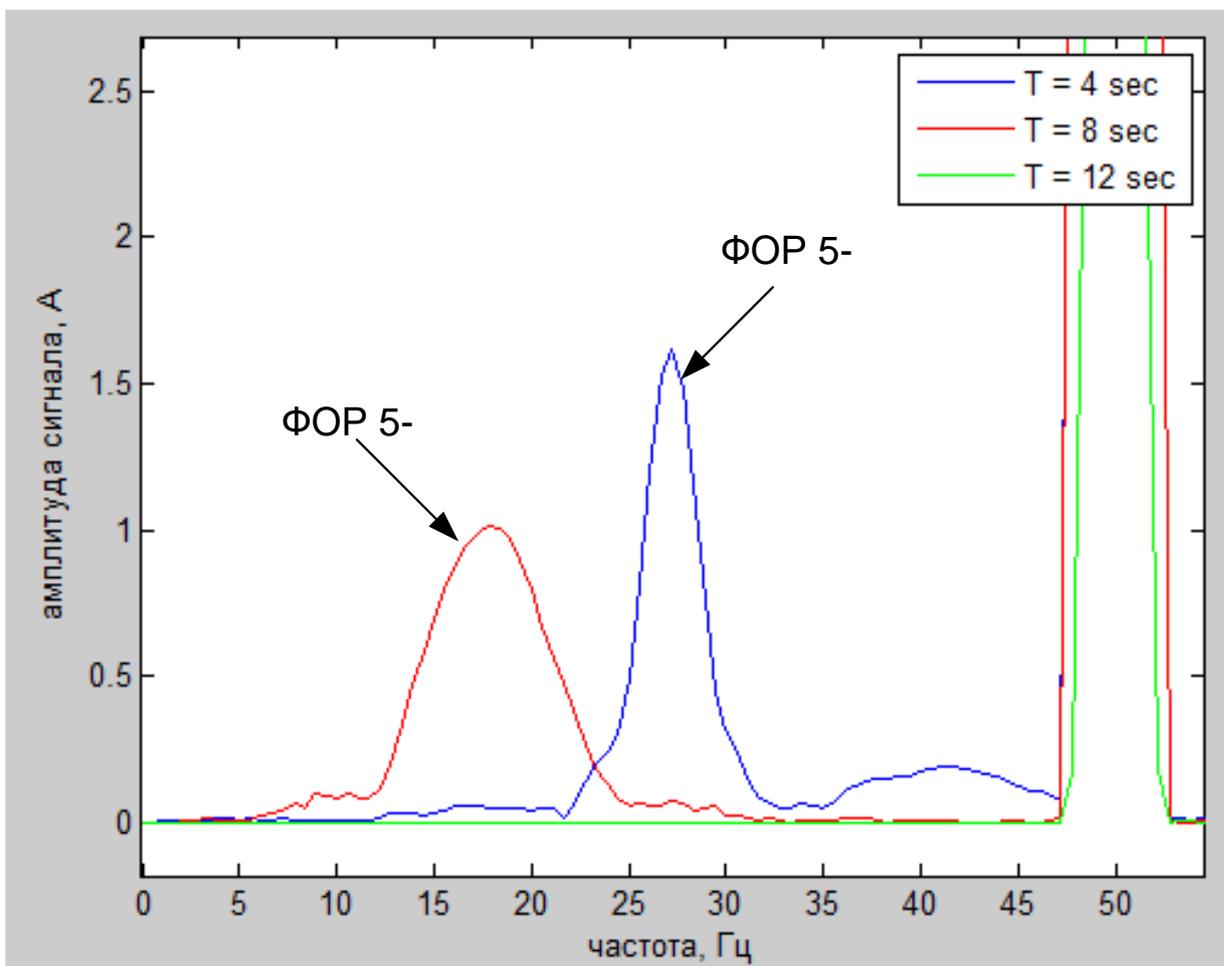


Рис. 3.29. Амплитудные спектры сигнала тока статора на модели ДАМСО-15-12-8 с 1 оборванным стержнем в моменты времени 4, 8 и 12 сек

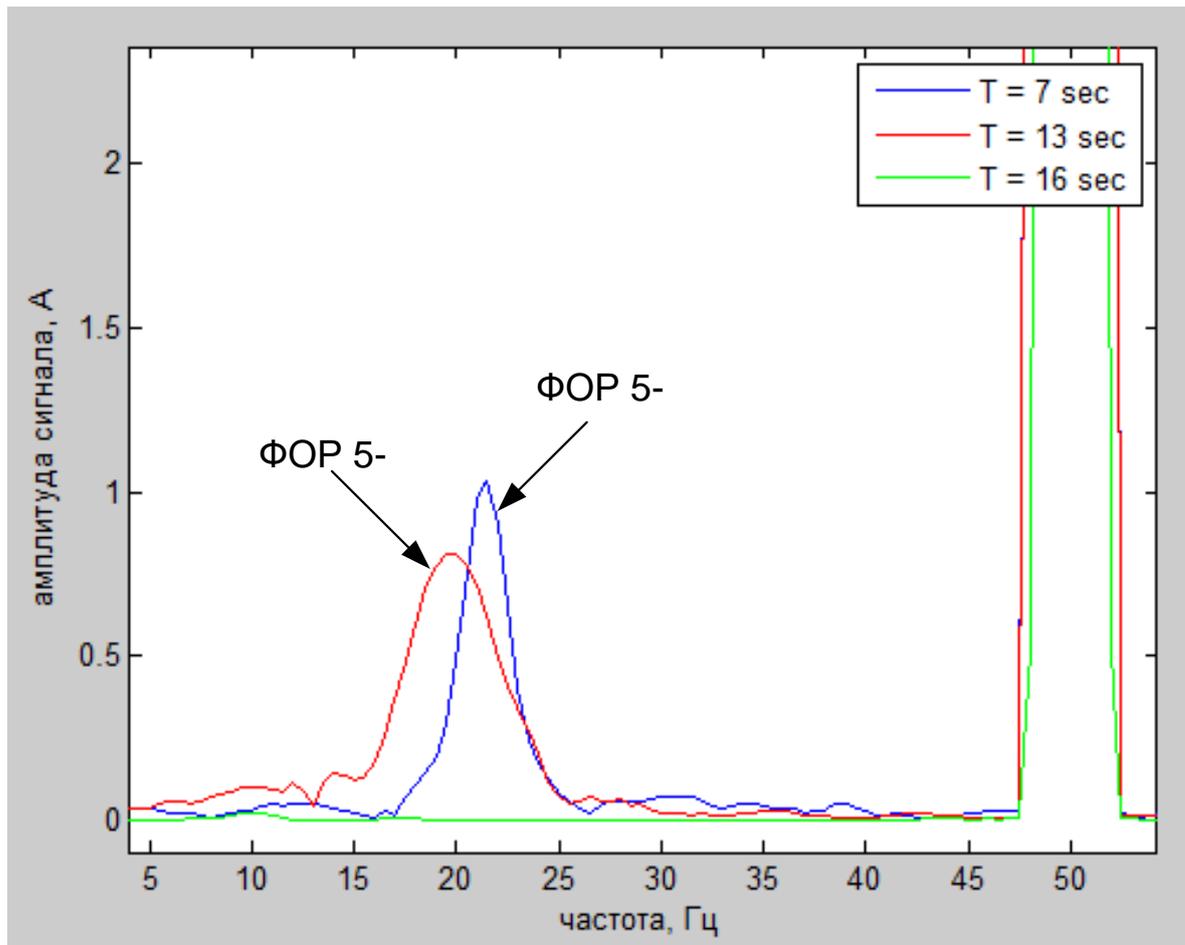


Рис. 3.30. Амплитудные спектры сигнала тока статора на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с 1 оборванным стержнем в моменты времени 7, 13 и 16 сек

3.5. Моделирование процесса длительного пуска высоковольтной машины на модели двигателя малой мощности при подаче пониженного напряжения

Поскольку проведение экспериментальных исследований влияния обрывов стержней на реальных высоковольтных АД СН электростанций затруднительно и требует больших материальных затрат, то исследования были также проведены и на разработанной ранее (представленной в [98]) модели низковольтного АД АИР71А6 мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов, которая представлена на рис. 3.31, для возможности сравнения полученных результатов на модели и на реальном АД.

Поскольку речь идет об АД малой мощности, время его пуска не превышает 0.25 сек даже при наличии подключенного механизма. Как уже было показано в

предыдущей главе, при таком времени пуска невозможно получить качественный спектр исследуемого сигнала. В связи с этим для рассматриваемого двигателя без использования специальных средств затягивания пуска применение метода обработки на основе ОПФ невозможно.

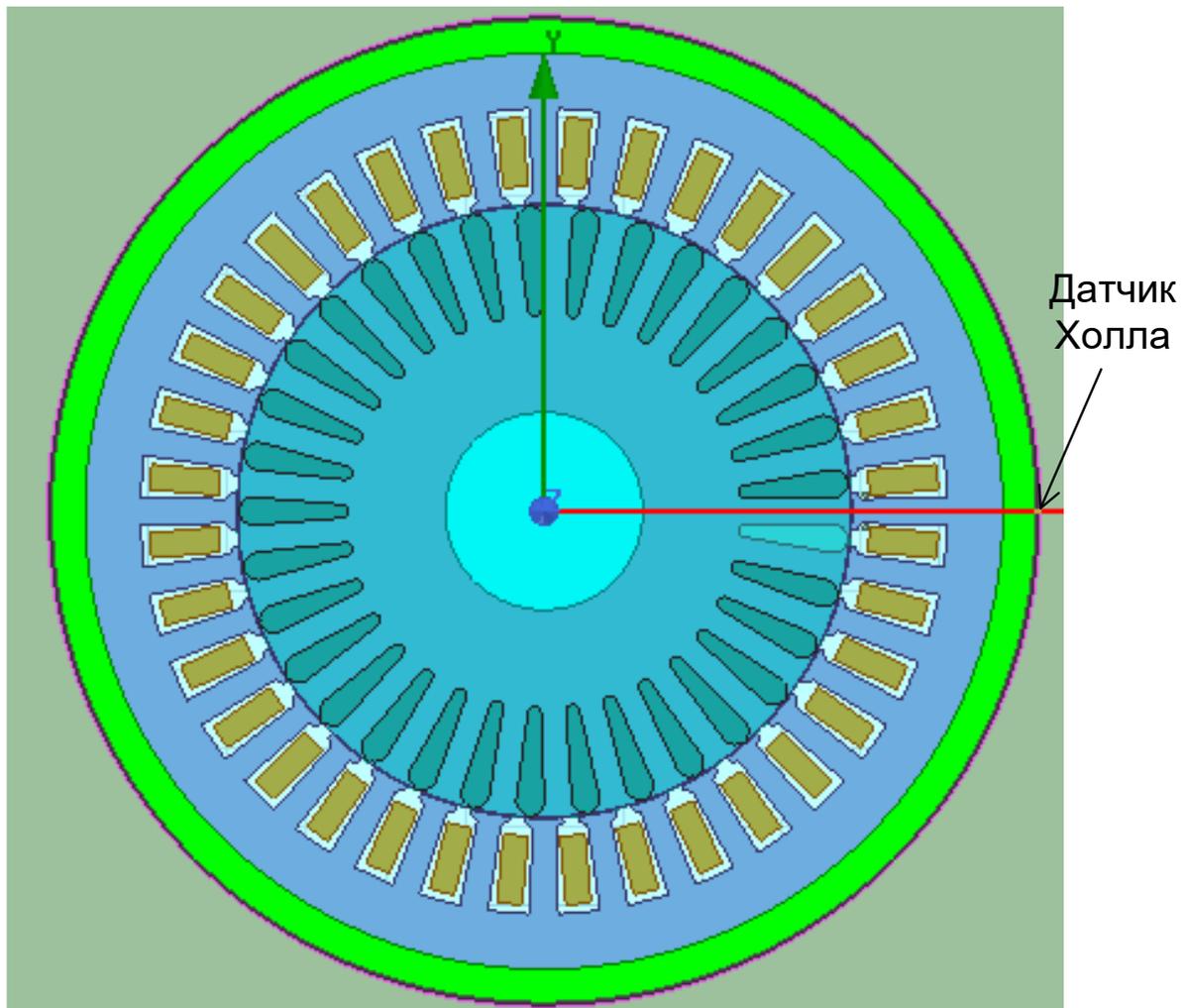


Рис. 3.31. Модель низковольтного АД малой мощности типа АИР71А6

На длительность пуска оказывают влияние такие факторы, как вращающий момент самого АД и момент сопротивления подключенного механизма (рабочей машины). При этом соотносить эти параметры на экспериментальном стенде при номинальном напряжении так, чтобы время пуска составляло хотя бы 3 секунды, не представляется возможным. Однако имеется возможность получения более длительного пуска путем понижения питающего напряжения, так как в этом случае значительно снижается вращающий момент АД. Этот способ можно легко

реализовать и на математической модели (уменьшив напряжение каждой фазы АД), так и на реальных объектах. Для подобного испытания достаточно подать на АД напряжение значительно ниже номинального через регулировочный автотрансформатор. Для определения возможности контроля технического состояния на подобных АД при подаче пониженного напряжения на математической модели АИР71А6 был произведен анализ влияния величины питающего напряжения на время пуска АД.

Так как при проведении исследований на реальном АД АИР71А6 к его валу не планируется подключать рабочую машину, то и математическая модель АД разработана для режима холостого хода. В ходе анализа было показано, что уменьшение питающего напряжения приводит к существенному увеличению времени пуска. При этом на очень низких напряжениях (менее 100 В) кроме увеличения времени пуска уменьшается также и скорость вращения АД в установившемся режиме. Поэтому для построения спектров было выбрано такое напряжение, при котором время пуска было бы близко к граничному (определяемому по выражению (2.20)) для отображения в спектре гармоник от ФОР первых трех порядков при использовании окна Флэттоп для сигнала ВМП. В ходе оценки было показано, что при напряжении, равном 50 В, время пуска АД составляет около 3-4 секунд, что является достаточным для разработанного алгоритма. График изменения скорости вращения двигателя, а также тока статора одной из фаз, приведены на рис. 3.32 и 3.33 соответственно. Следует обратить внимание, что амплитуда тока статора изменяется в процессе пуска лишь незначительно. При этом, как хорошо видно из рис. 3.32, при таком напряжении двигатель может разогнаться до скорости значительно ниже синхронной, поэтому и скольжение двигателя будет значительно больше 0. Тем не менее, поведения гармоник от ФОР при пуске для АД малой мощности и реальных высоковольтных АД с длительным пуском должны соответствовать друг другу.

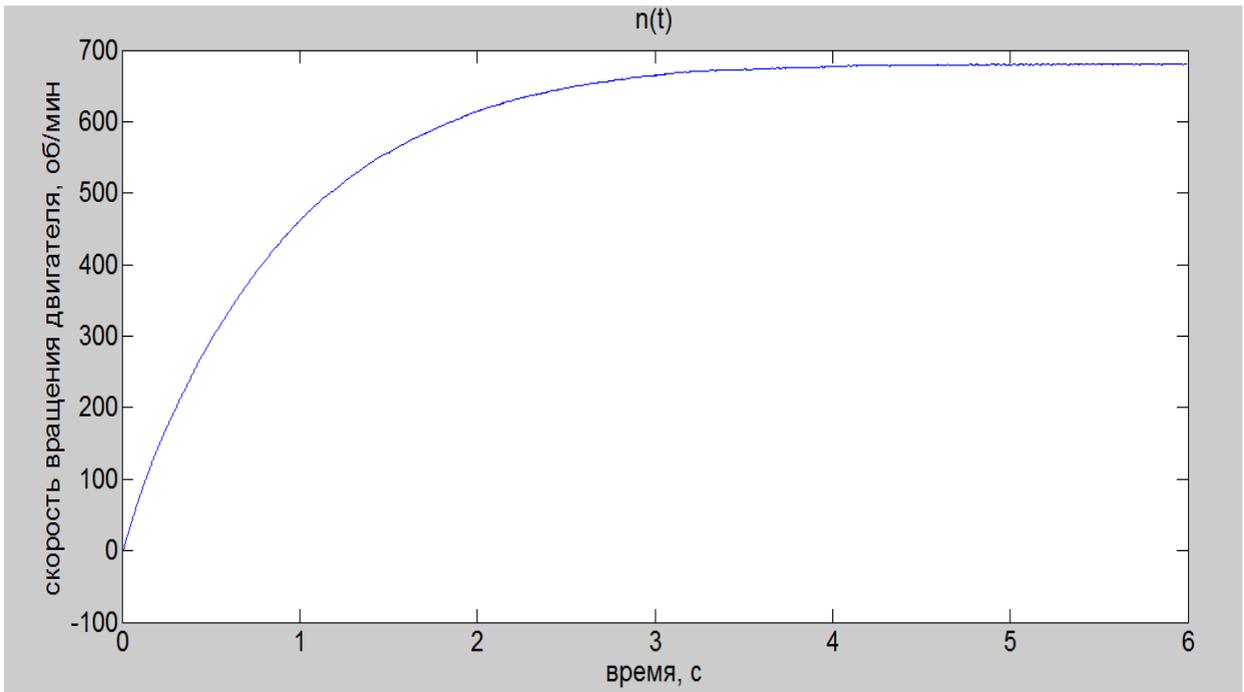


Рис. 3.32. Изменение скорости вращения математической модели АИР71А6 при пуске при подаче пониженного напряжения (50 В)

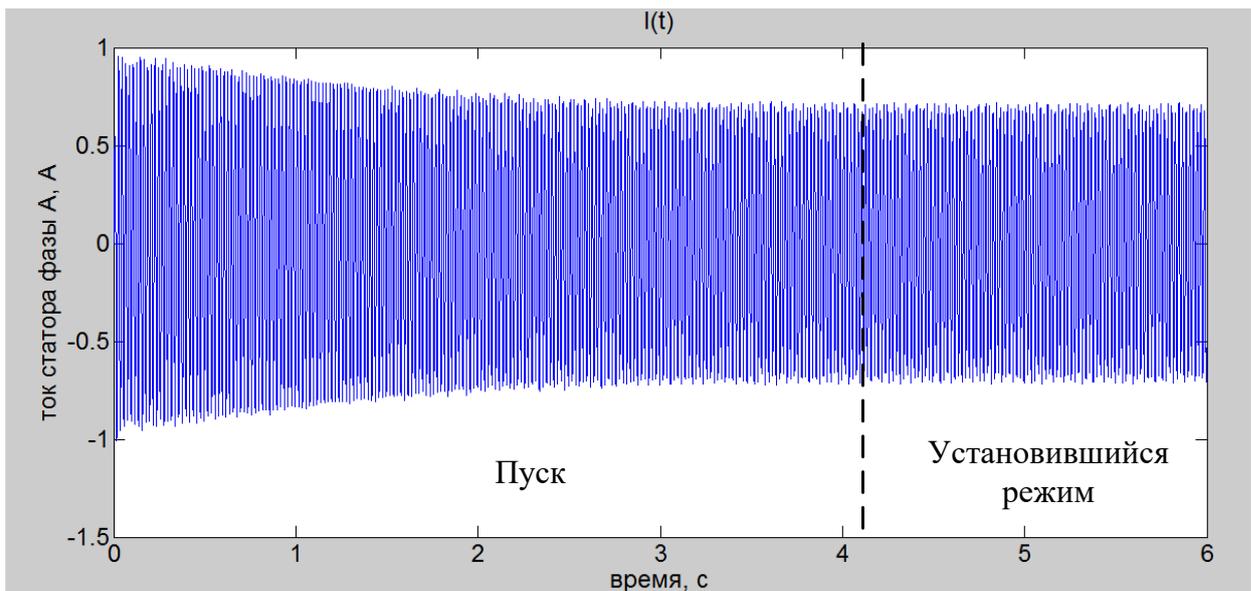


Рис. 3.33. Изменение тока статора математической модели АИР71А6 при пуске при подаче пониженного напряжения (50 В)

3.6. Исследование спектров радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора на модели асинхронного двигателя малой мощности при пуске на пониженном напряжении

Построение спектров произведено аналогичным образом, как и для моделей высоковольтных АД с длительным пуском. При этом для оценки корректности

полученных результатов также аналогично были определены и расчетные значения частот. Полученные спектры сигналов ВМП приведены на рис. 3.34-3.36, расчетные значения частот в спектре АД представлены на рис. 3.37 и 3.38. Спектры сигналов тока статора представлены на рис. 3.39-3.41, а расчетные значения частоты гармоники от ФОР р- – на рис. 3.42.

Кроме того, были построены также и спектры внутреннего магнитного поля, регистрируемого внутри воздушного зазора электродвигателя, для возможности дальнейшего сопоставления результатов математического и физического моделирования. Кроме того, сигнал внутреннего поля представляет большой интерес, так как в нем должно содержаться наибольшее количество характерных гармонических составляющих. Полученные спектры внутреннего магнитного поля низковольтного АД при наличии и отсутствии неисправностей при подаче пониженного напряжения приведены на рис. 3.43-3.45.

Из полученных результатов отчетливо видно, что спектры тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля соответствуют расчетным зависимостям, кроме того, наглядно показывают, что лишь при обрыве стержней в ЧВС отчетливо проявляются гармонические составляющие от ФОР, частоты которых определяются по выражениям (2.3) и (2.4) (для внешнего и внутреннего магнитных полей) или (2.6) (для тока статора). Кроме того, видно соответствие частот гармонических составляющих во внешнем и внутреннем поле, однако особенностью спектра внутреннего магнитного поля являются высокие амплитуды гармоник более высоких порядков.

При этом следует отметить, что в отличие от мощных высоковольтных АД, при пуске низковольтных АД на пониженном напряжении амплитуды гармоник ДЭ при пуске становятся соизмеримыми с амплитудами гармоник от ФОР. Поэтому при исследованиях на АД малой мощности при подаче пониженного напряжения характерным признаком наличия обрывов стержней ОР может служить лишь рост амплитуд отраженных гармоник от ФОР.

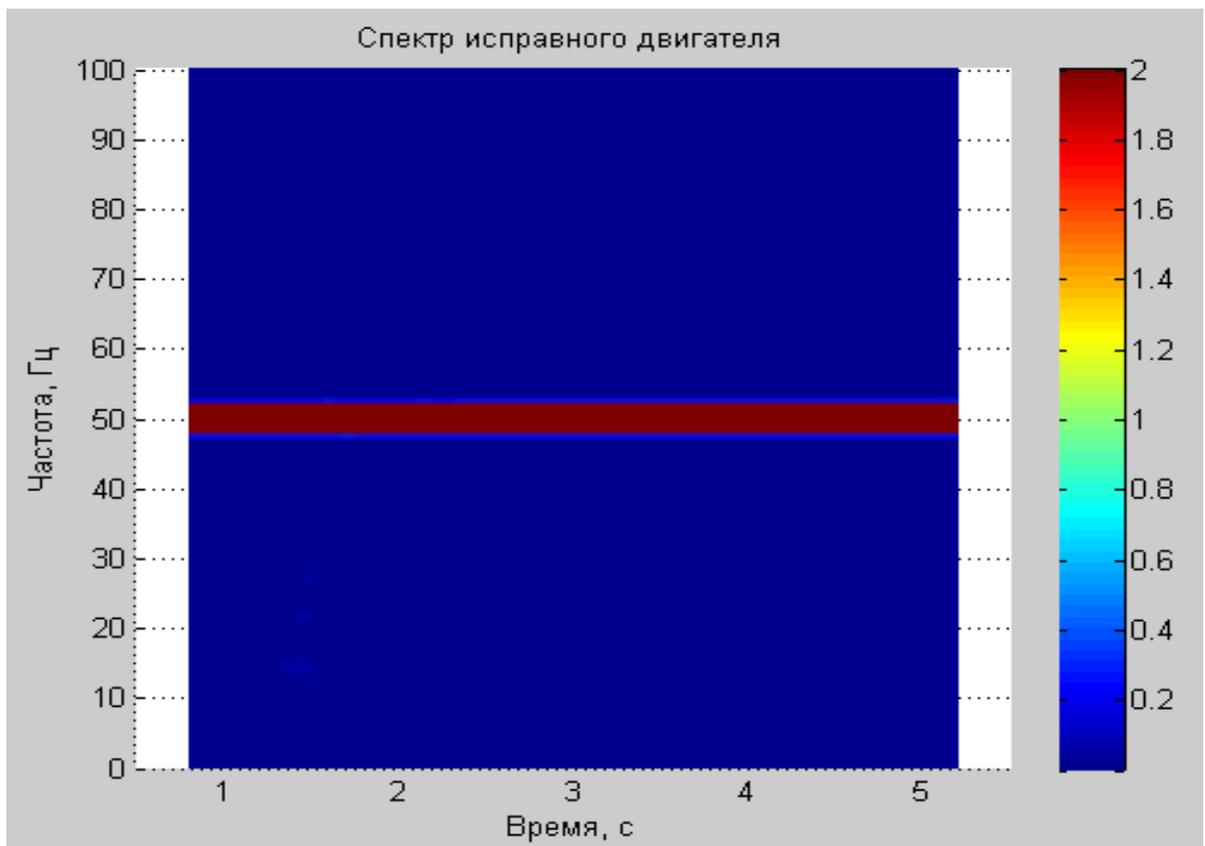


Рис. 3.34. ЧВС сигнала ВМП на математической модели АИР71А6 с исправной ОР при подаче пониженного напряжения (50 В)

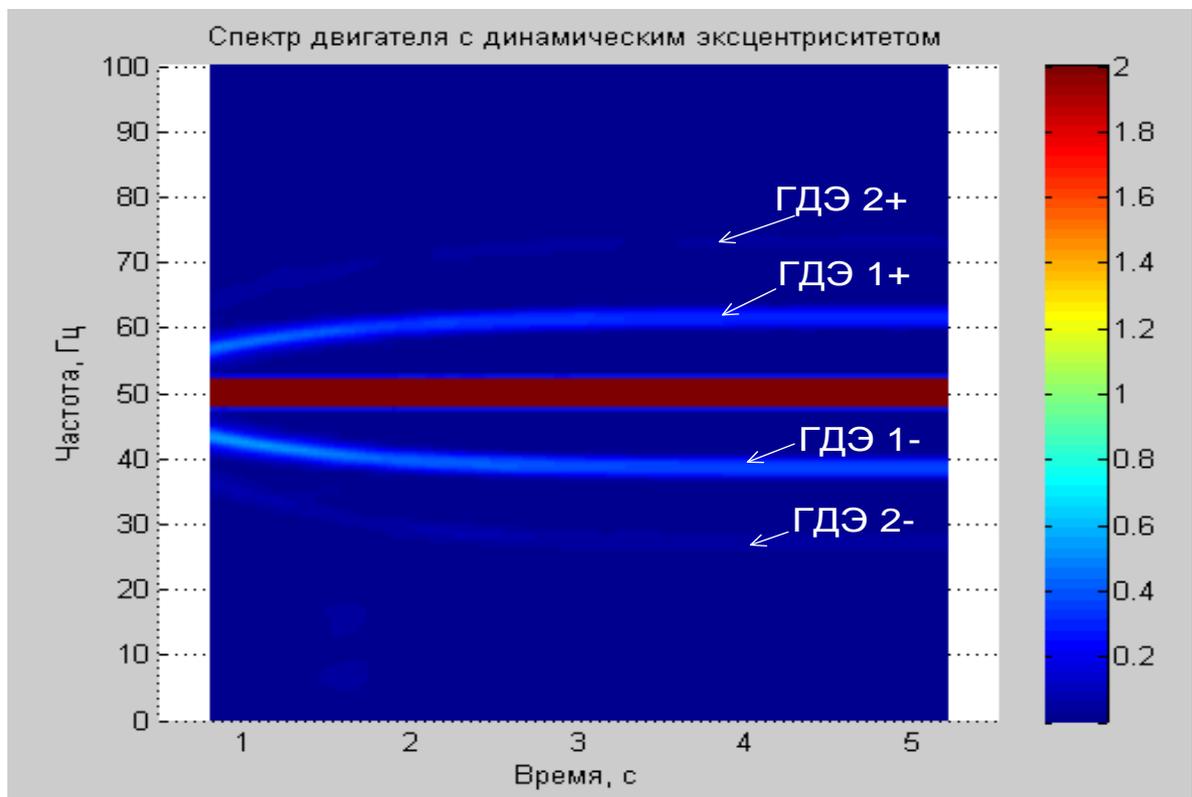


Рис. 3.35. ЧВС сигнала ВМП на математической модели АИР71А6 с ДЭ (30% от величины воздушного зазора) при подаче пониженного напряжения (50 В)

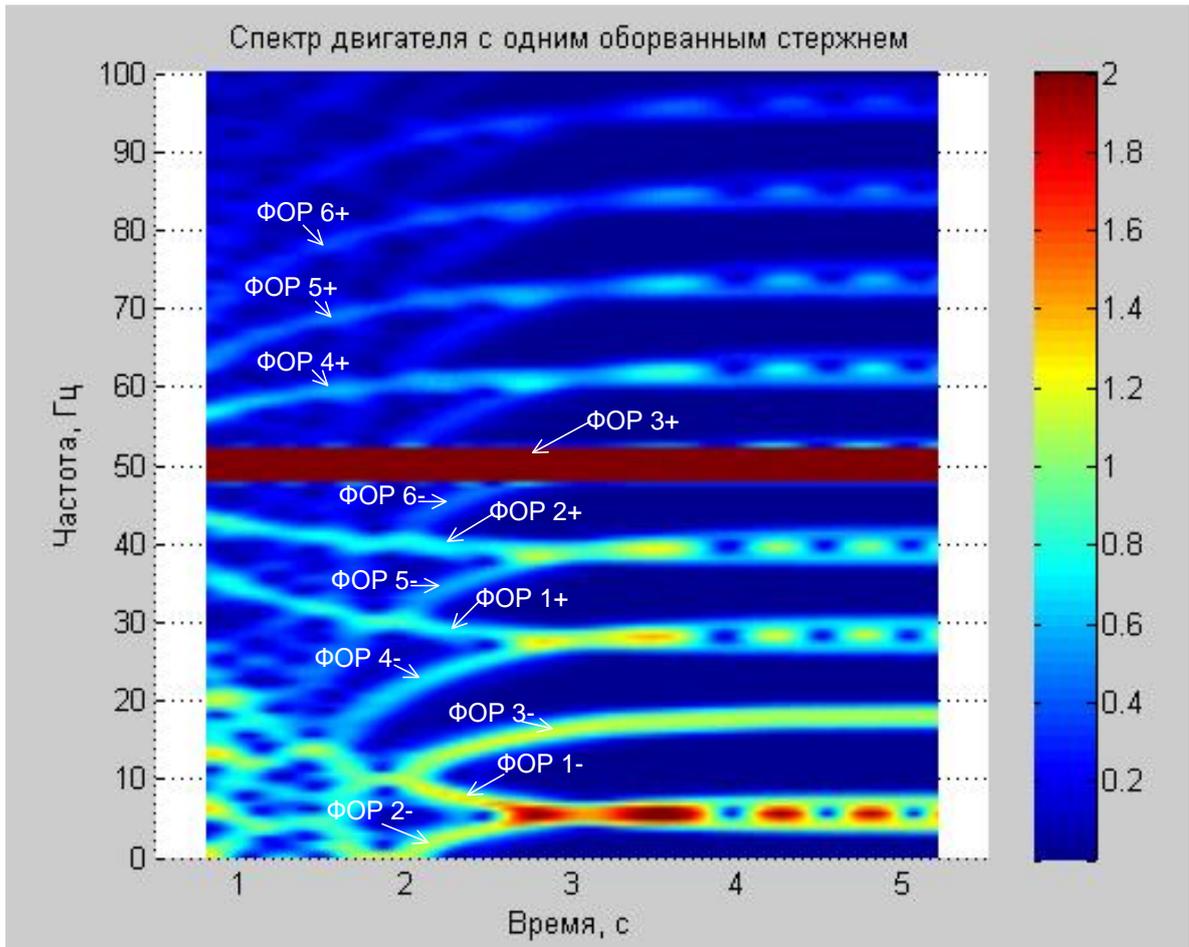


Рис. 3.36. ЧВС сигнала ВМП на математической модели АИР71А6 с одним оборванным стержнем ОР при подаче пониженного напряжения (50 В)

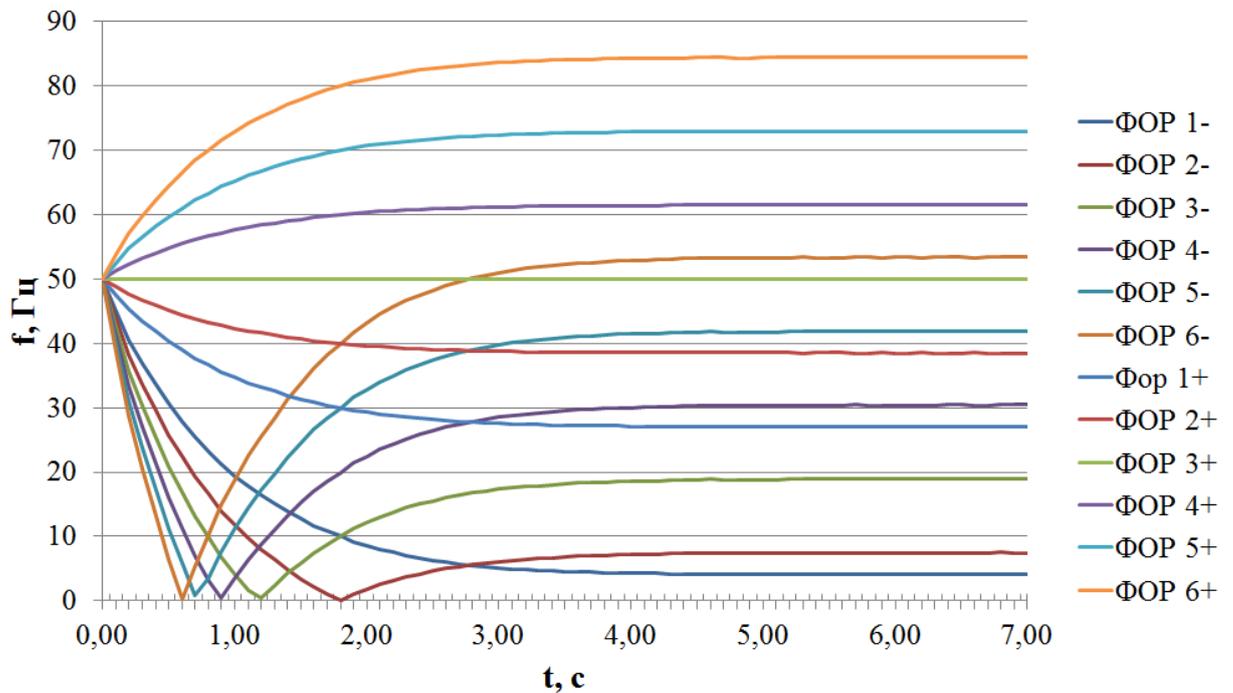


Рис. 3.37. Расчетные значения частот гармоник от ФОР в спектре ВМП на математической модели АИР71А6 при пуске на пониженном напряжении (50 В)

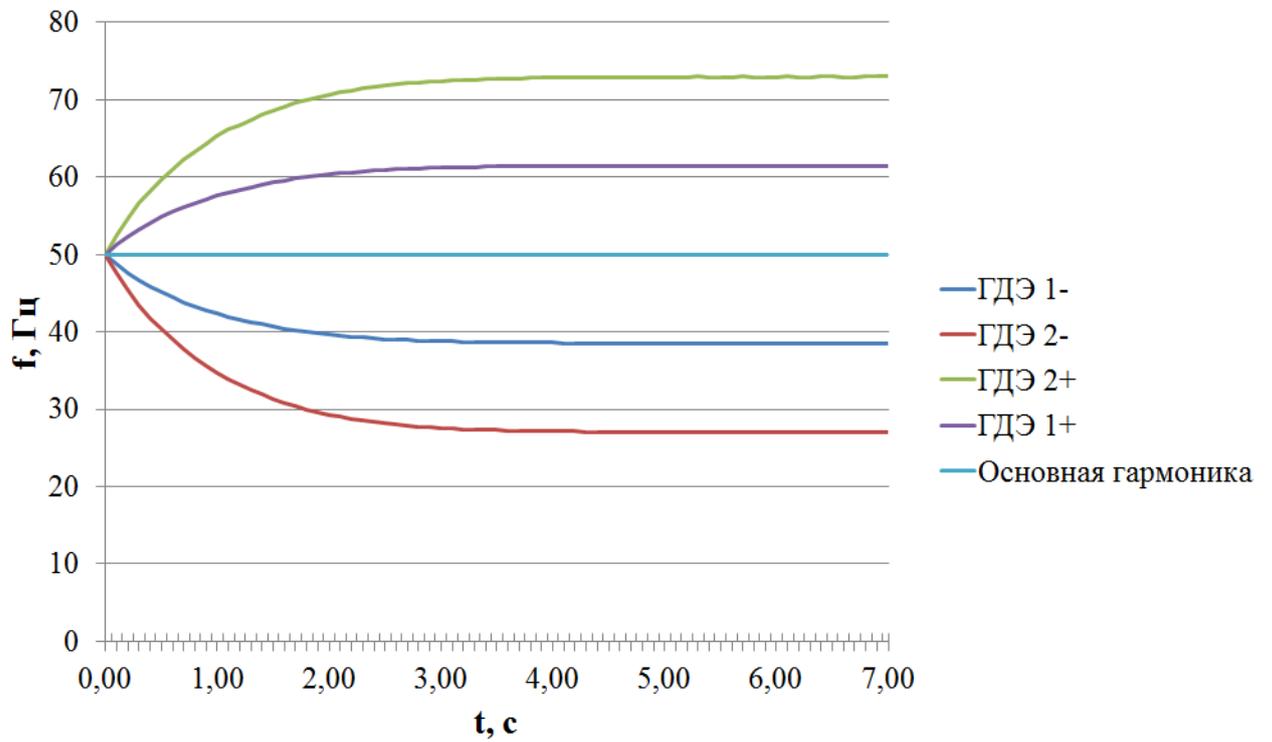


Рис. 3.38. Расчетные значения частот гармоник ДЭ в спектре ВМП на математической модели АИР71А6 при пуске на пониженном напряжении (50 В)

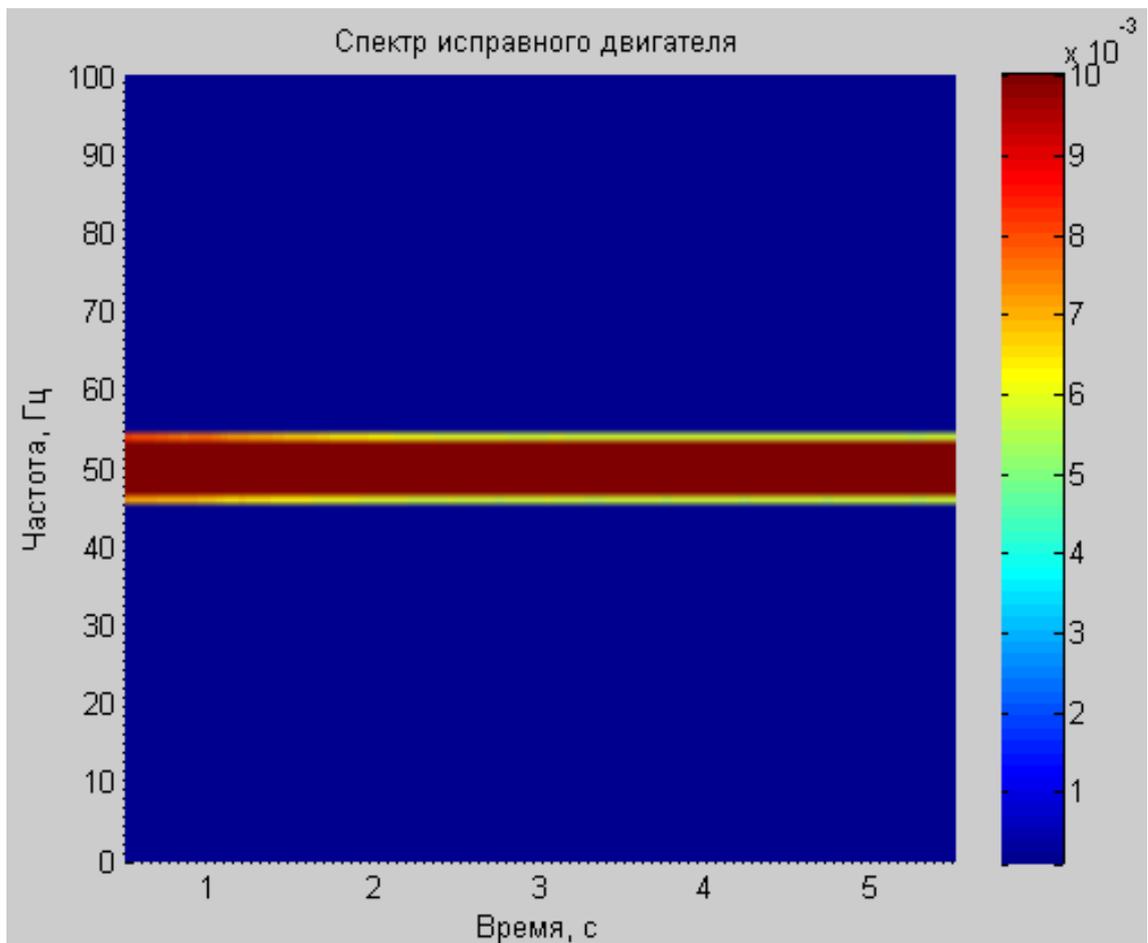


Рис. 3.39. ЧВС сигнала тока статора на математической модели АИР71А6 с исправной ОР при подаче пониженного напряжения (50 В)

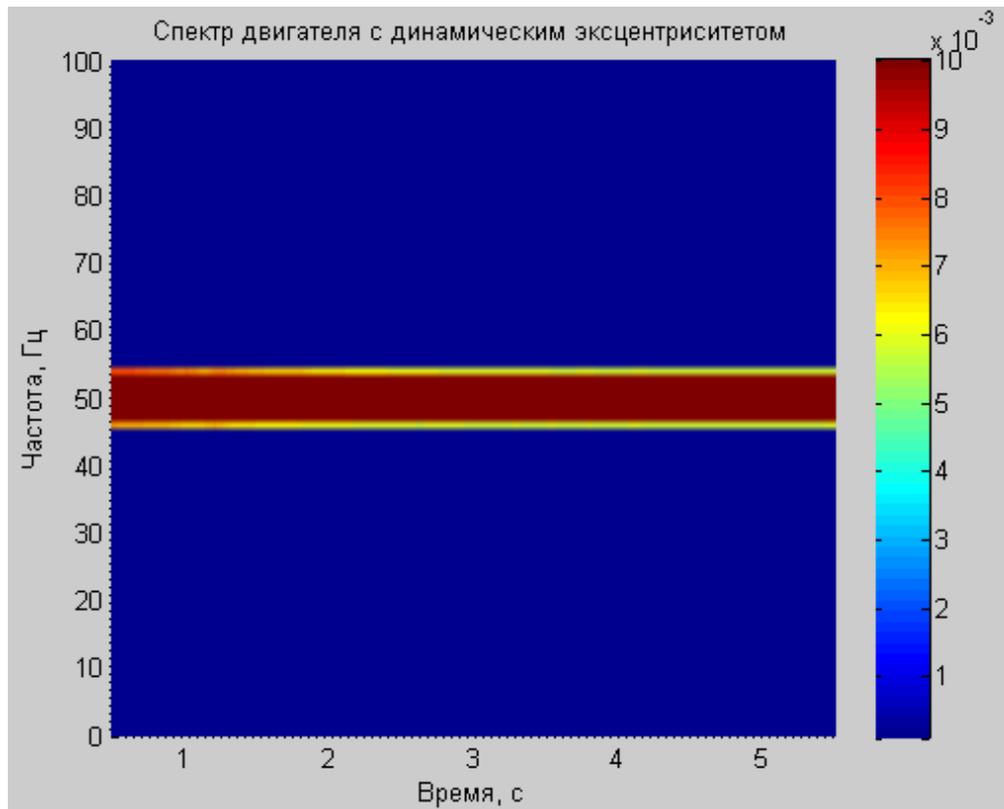


Рис. 3.40. ЧВС сигнала тока статора на математической модели АИР71А6 с ДЭ (30% от величины воздушного зазора) при подаче пониженного напряжения (50 В)

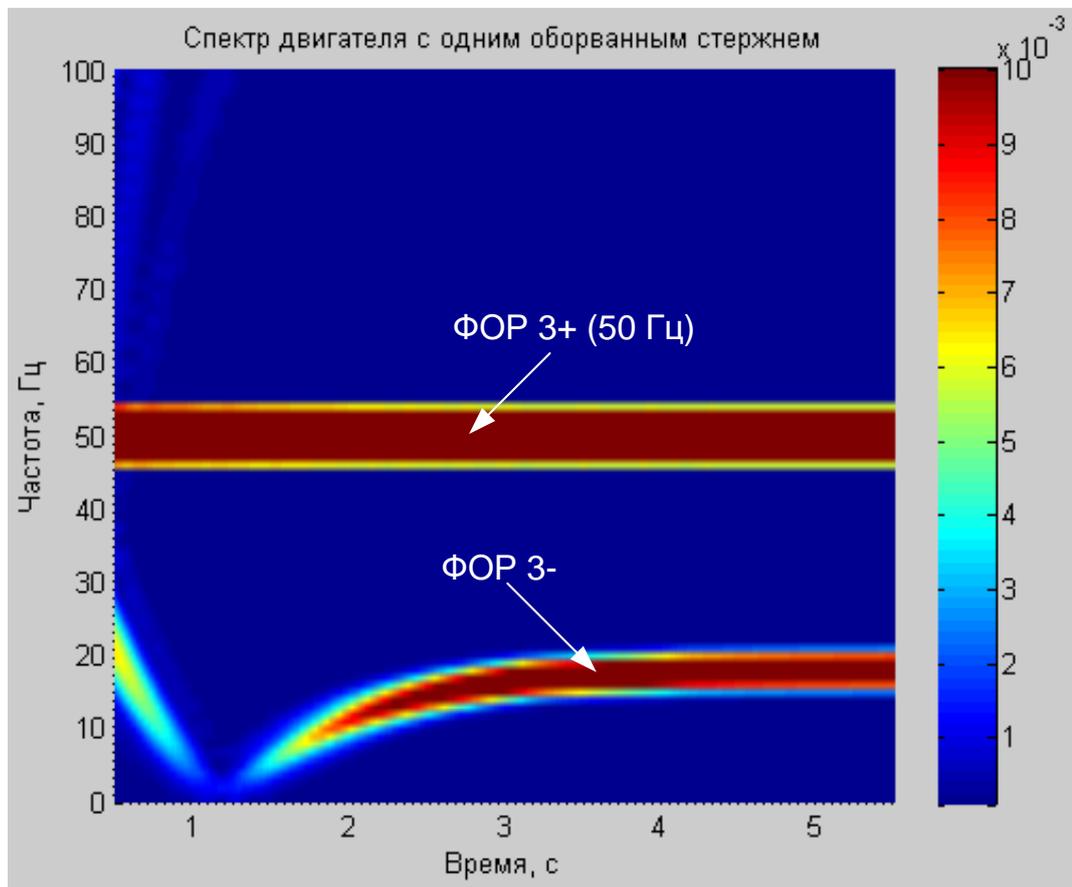


Рис. 3.41. ЧВС сигнала тока статора на математической модели АИР71А6 с одним оборванным стержнем ОР при подаче пониженного напряжения (50 В)

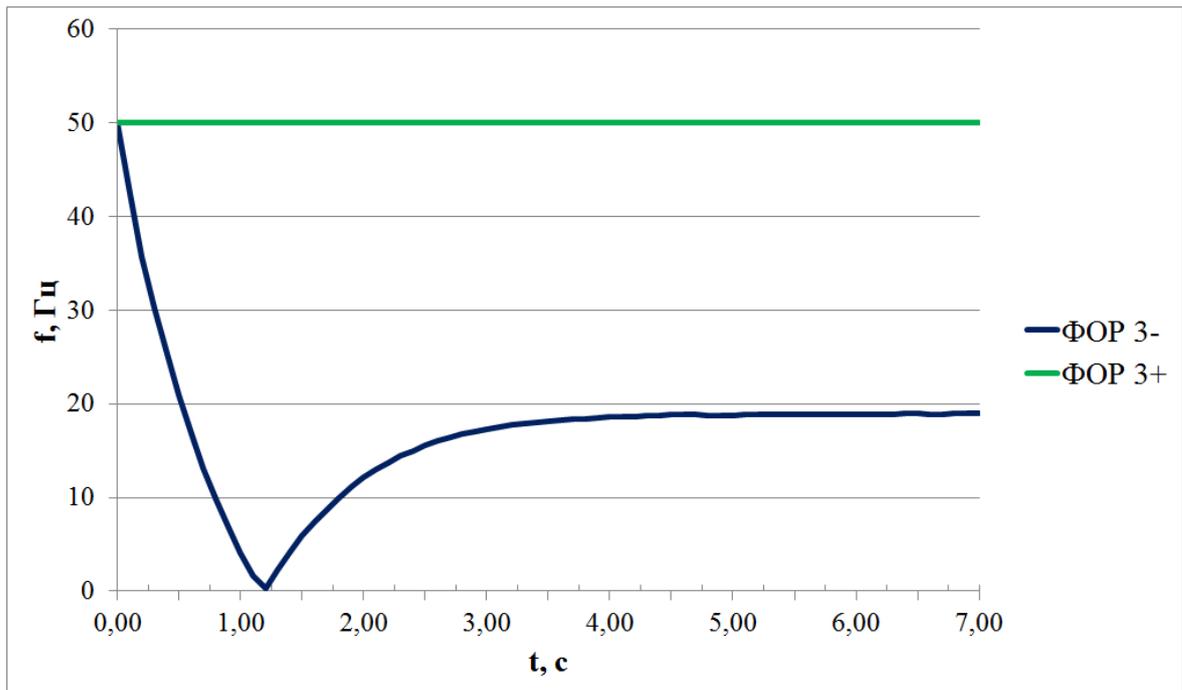


Рис. 3.42. Расчетные значения частот гармоник от ΦОР в спектре тока статора на математической модели АИР71А6 при пуске на пониженном напряжении (50 В)

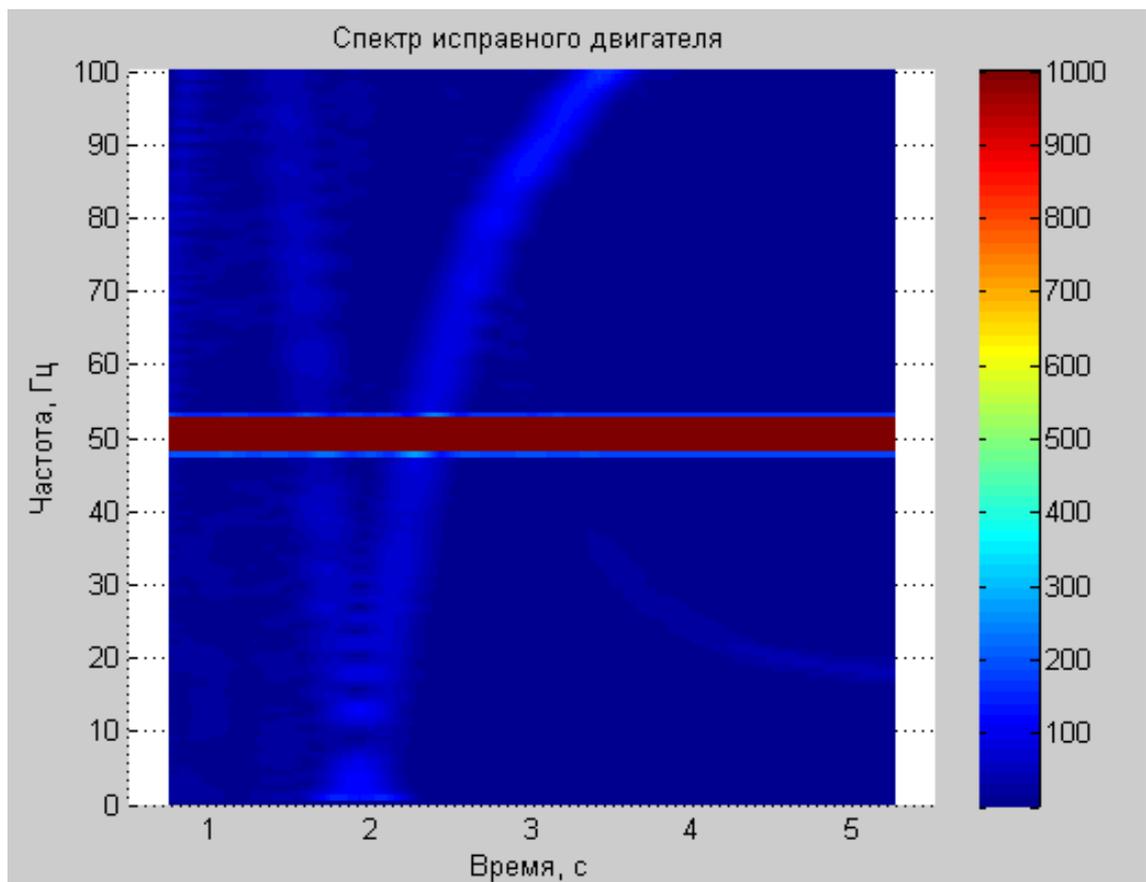


Рис. 3.43. ЧВС сигнала внутреннего магнитного поля на математической модели АИР71А6 с исправной обмоткой ротора при подаче пониженного напряжения (50 В)

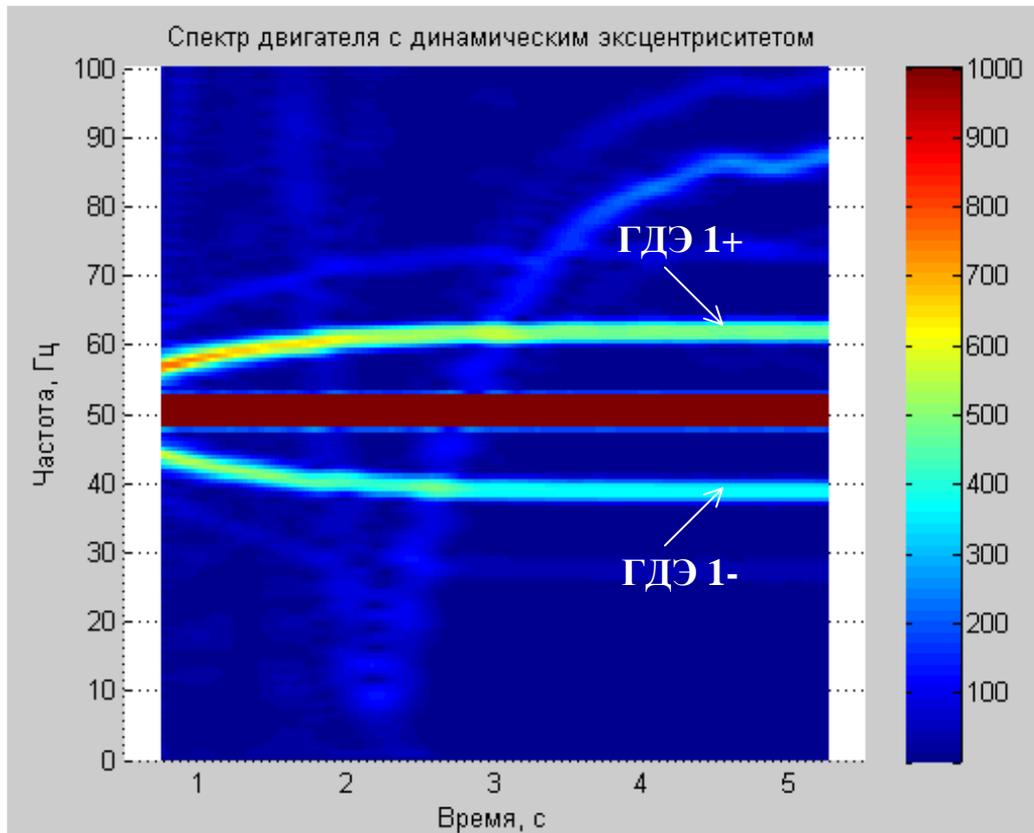


Рис. 3.44. ЧВС сигнала внутреннего магнитного поля на математической модели АИР71А6 с динамическим эксцентриситетом (30% от величины воздушного зазора) при подаче пониженного напряжения (50 В)

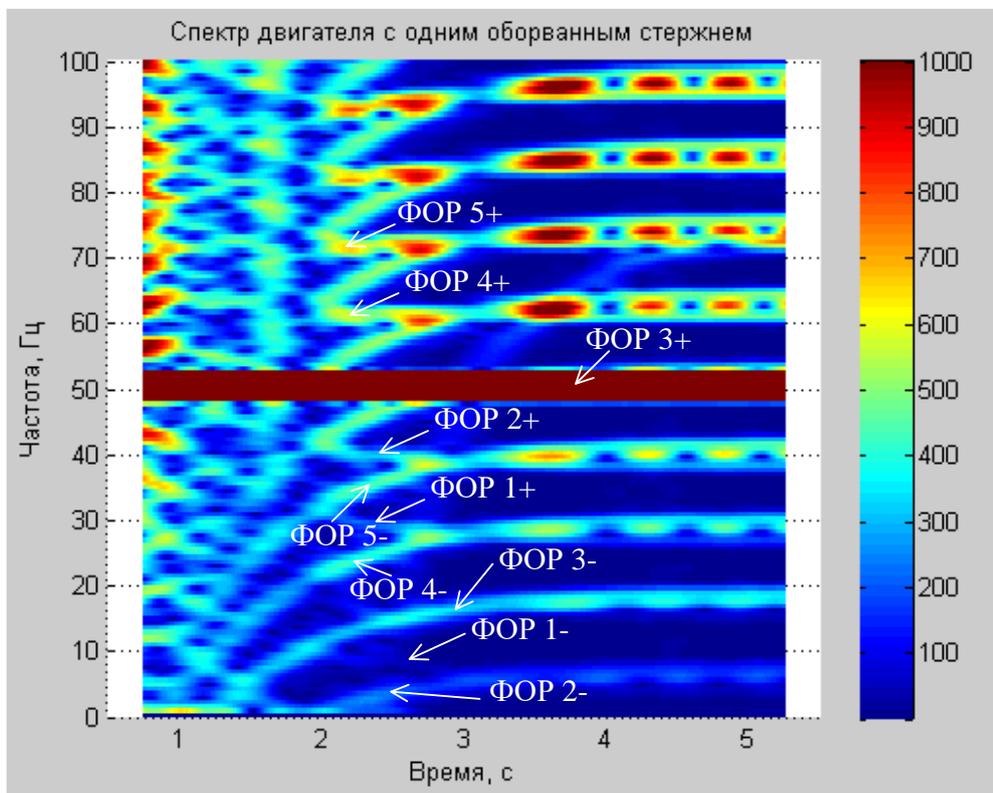


Рис. 3.45. ЧВС сигнала внутреннего магнитного поля на математической модели АИР71А6 с 1 оборванным стержнем короткозамкнутой ОР при подаче пониженного напряжения (50 В)

Как и для высоковольтных АД, сравним амплитуды гармоник от ФОР и ДЭ сигналов ВМП и тока статора в пусковом и установившемся режиме. Для этого построим амплитудные спектры, как и для высоковольтных двигателей, для 3 моментов времени: 2 сек, 2.5 сек и 4 сек. Полученные спектры ВМП для моделей с ДЭ и с одним оборванным стержнем ОР приведены на рис. 3.46 и 3.47 соответственно, а спектр тока статора на модели АД с одним оборванным стержнем ОР – на рис. 3.48.

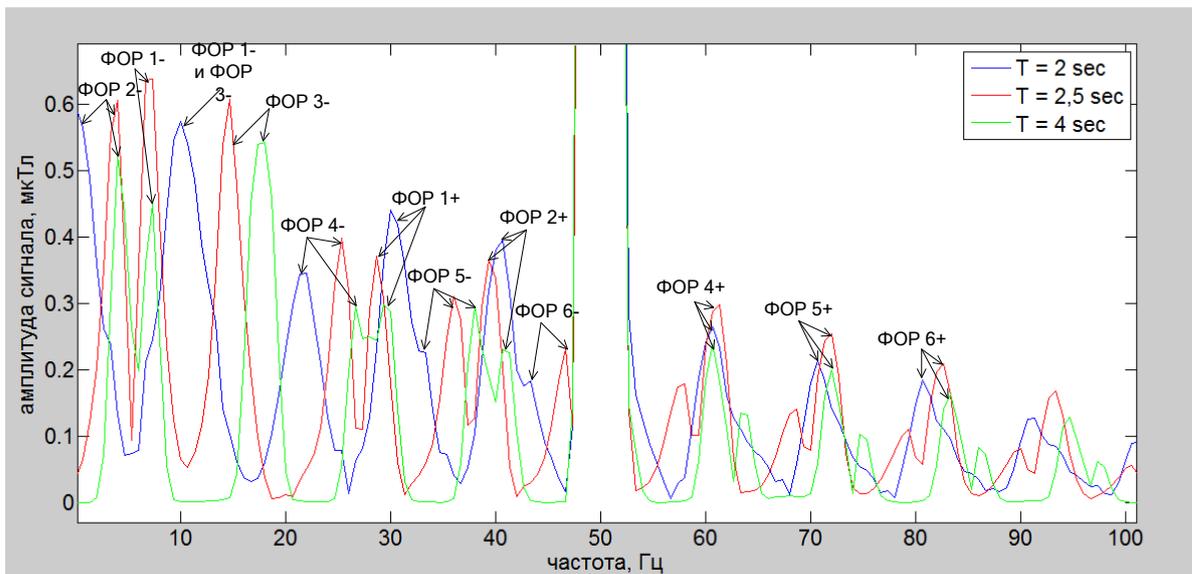


Рис. 3.46. Амплитудные спектры сигнала ВМП на модели АИР71А6 с 1 оборванным стержнем в моменты времени 2, 2.5 и 4 сек при пуске на пониженном напряжении

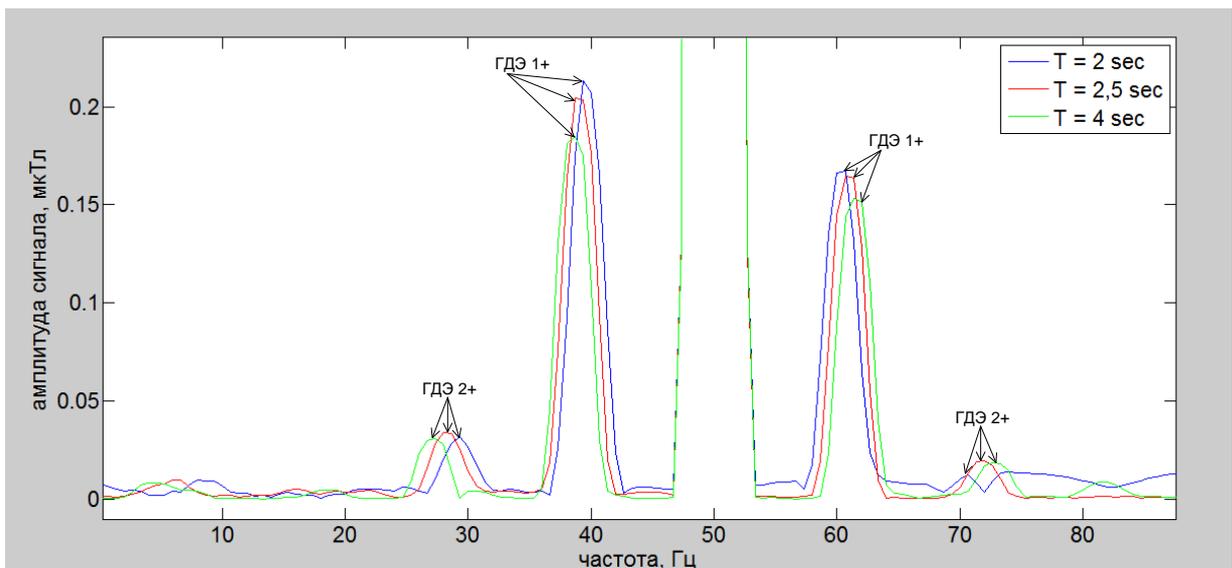


Рис. 3.47. Амплитудные спектры сигнала ВМП на модели АИР71А6 с ДЭ (30%) в моменты времени 2, 2.5 и 4 при пуске на пониженном напряжении

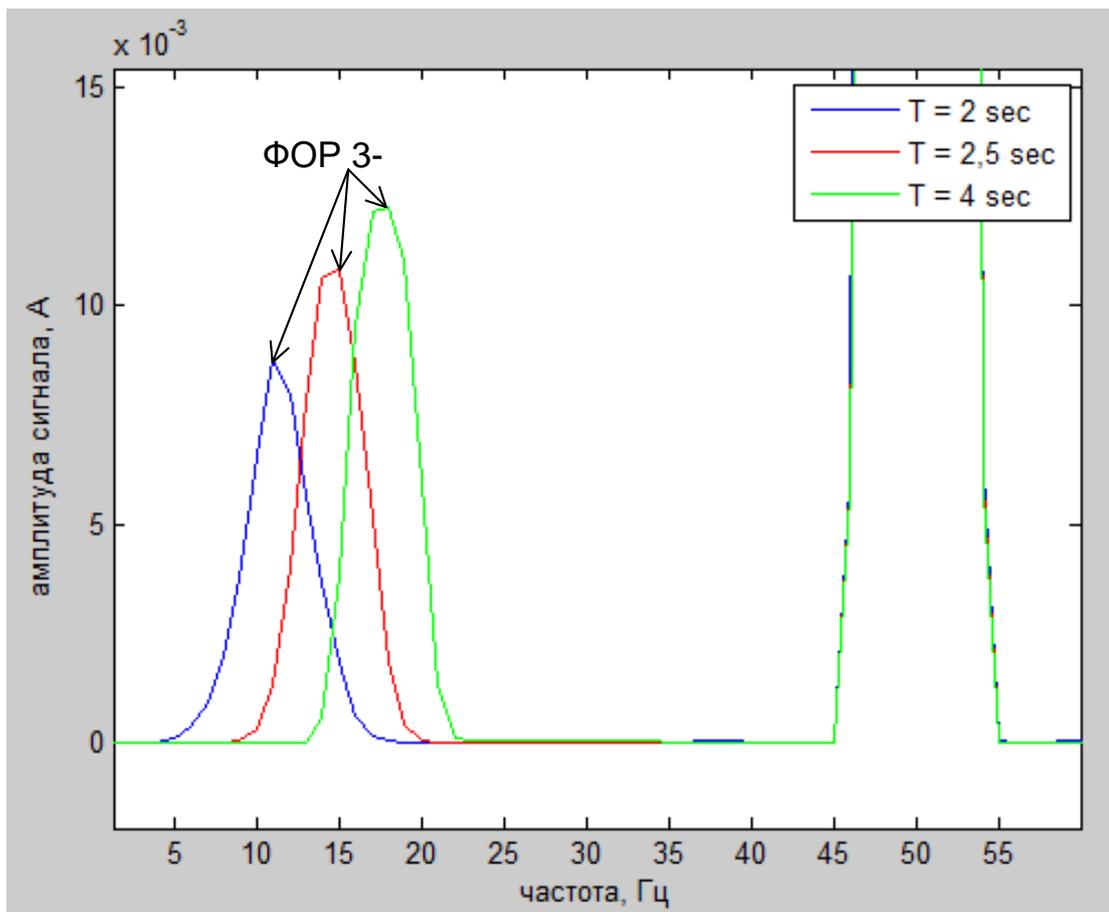


Рис. 3.48. Амплитудные спектры сигнала тока статора на модели АИР71А6 с 1 оборванным стержнем в моменты времени 2, 2.5 и 4 сек при пуске на пониженном напряжении

Из рис. 3.46-3.48 видно, что амплитуды гармонических составляющих от ФОР как для ВМП, так и для тока статора при пуске и в установившемся режиме мало различаются (особенно по сравнению с высоковольтным двигателем). Это может быть объяснено тем, что амплитуда тока статора при пуске АД на пониженном напряжении незначительно превышает амплитуду тока в установившемся режиме (как можно увидеть из рис. 3.33). В связи с этим амплитуды гармоник в пусковом режиме приблизительно такие же, что и в установившемся режиме, что затрудняет процесс контроля. С другой стороны, несмотря на малое изменение амплитуд, они все равно довольно отчетливо проявляются в спектре и пригодны для контроля технического состояния АД.

Таким образом, в ходе проведенных исследований на математических моделях низковольтных АД малой мощности доказано, что на подобных АД возможно проведение экспериментальных исследований сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля при подаче пониженного напряжения

(менее 50 В). Также эти результаты могут быть использованы для сравнения получаемых на математической модели и на реальном АД результатов.

3.7. Сравнение чувствительности разработанных методов контроля технического состояния с существующими

Для проведения сравнения использованы математические модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 с исправной ОР и с одним оборванным стержнем. Для сравнения с разработанным методом выбраны 3 наиболее эффективных и проработанных на текущий момент методов контроля наличия или отсутствия оборванных стержней: метод контроля на основе сравнения пиковых значений амплитуд пускового тока статора, метод на основе выявления характерной гармоник в спектре тока статора в установившемся режиме работы и метод на основе выявления гармоник от ФОР в спектре ВМП в установившемся режиме работы. ОР АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 содержит 132 стержня, а как известно, чем больше стержней содержит ОР, тем труднее диагностировать наличие одного оборванного стержня в ней. Поэтому каждый из рассматриваемых методов должен обладать высокой чувствительностью к повреждению одного стержня.

3.7.1. Оценка чувствительности метода на основе сравнения пиковых значений амплитуд тока статора в течение пуска асинхронного электродвигателя

Данный метод, также часто называемый «ВОРС», подробно прописан в [36, 37]. На его основе разработано устройство для контроля наличия оборванных стержней ОР. Суть метода заключается в том, что в течение пуска при наличии оборванных стержней пиковые значения сигнала тока статора за каждый период в течение пуска после затухания апериодической составляющей могут существенно различаться, а при отсутствии обрывов быть практически неизменными в течение пуска. Поэтому для оценки чувствительности данных методов на рис. 3.49 и 3.50

приведены графики огибающей сигналов тока статора при пуске для модели АД с исправной ОР и при наличии одного оборванного стержня. Далее по полученным графикам была определена максимальная разница между соседними значениями амплитуд полученных сигналов. Оценка данных значений показала, что максимальная разница амплитуда сигнала при отсутствии обрыва составила 0,67 А, в то время как при наличии обрыва эта величина достигала 2,3 А. Отношение этих значений составило 3,43. Видно, что чувствительность данного метода при обрыве одного стержня очень низкая, даже на математической модели разница между искомыми значениями составляет менее 5, что затрудняет обнаружение обрывов стержней ОР исследуемых АД.

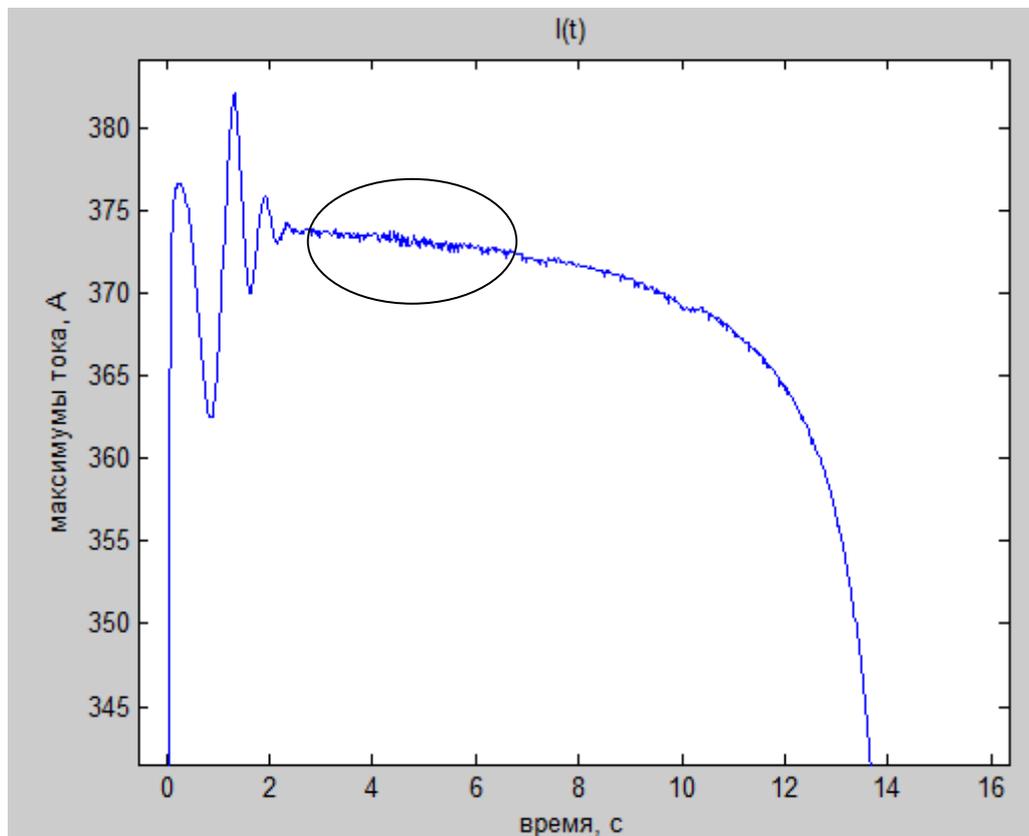


Рис. 3.49. Огибающая сигнала тока статора при пуске на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с исправной ОР

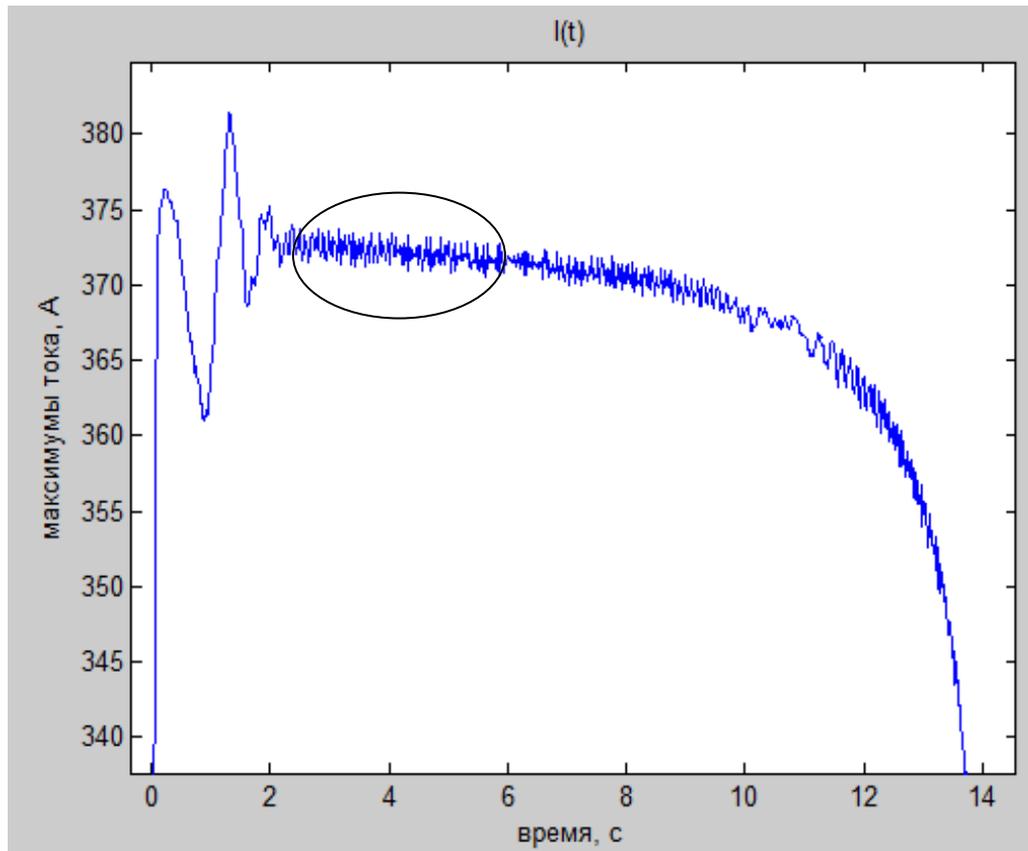


Рис. 3.50. Огибающая сигнала тока статора при пуске на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем ОР

3.7.2. Оценка чувствительности метода на основе определения амплитуды характерной гармоники в спектре тока статора в установившемся режиме работы

Метод, известный за рубежом как MCSA [50, 52], а также прописанный в ГОСТ по сигнатурному анализу АД [91], основан на спектральном анализе сигнала тока статора в установившемся режиме работы. Контроль АД осуществляется на основании определения в спектре амплитуды гармоники от ФОР на нижней боковой частоте, порядок которой совпадает с числом пар полюсов АД (ФОР p -), расположенной около основной гармоники сигнала с частотой 50 Гц. В качестве примера на рис. 3.51 приведен спектр сигнала тока статора для АД с одним оборванным стержнем ОР при номинальной нагрузке, в котором отмечена искомая гармоническая составляющая.

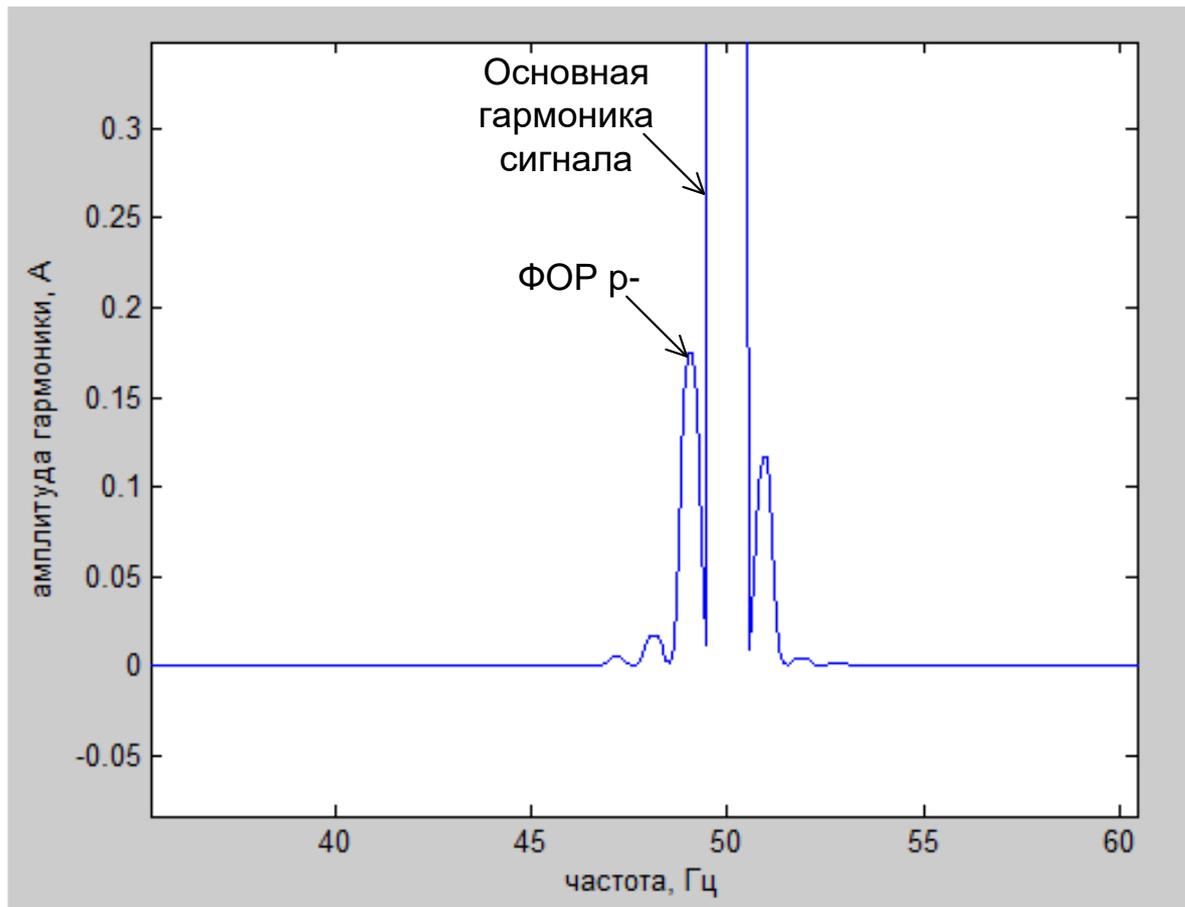


Рис. 3.51. Спектр тока статора на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с 1 оборванным стержнем

В ходе проведенного исследования на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 были определены амплитуды гармонической составляющей от ФОР 5- при различной нагрузке АД (холостой ход, 50% от номинальной нагрузки и при номинальной нагрузке) при исправной ОР и ОР с одним оборванным стержнем. Для наглядности результаты представлены в таблице 3.3.

Из представленных результатов видно, что чувствительность метода существенно возрастает при увеличении нагрузки. На холостом ходу гармоника от ФОР 5- неразличима в спектре, поскольку ее частота практически не отличается от частоты основной гармоники, так как скольжение в режиме холостого хода близко к 0.

При 50% загрузке АД соотношение амплитуд составляет всего 5,667 даже на математической модели, поэтому при малой загрузке АД чувствительность АД к повреждениям ОР является недостаточной. Только при номинальной нагрузке соотношение близко к 20 и может быть использовано для проведения контроля.

При этом, как было отмечено в первой главе, обычно АД электростанций работают с нагрузкой, составляющей 55-80% от номинальной, что значительно усложняет процесс контроля данным методом высоковольтных АД СН электростанций.

Таблица 3.3. Амплитуда гармоники от ФОР 5- тока статора в установившемся режиме на модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1

Нагрузка АД	Амплитуда гармоники при исправной ОР	Амплитуда гармоники при наличии одного оборванного стержня ОР	Соотношение амплитуды гармоники от ФОР при наличии и отсутствии обрыва
Холостой ход	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре	-
50% от номинальной нагрузки	0,0117	0,0663	5,667
Номинальная нагрузка	0,07468	0,1367	18,305

3.7.3. Оценка чувствительности метода на основе определения амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора в спектре внешнего магнитного поля в установившемся режиме работы

Данный метод подробно рассмотрен в ряде российских и зарубежных диссертаций [98, 101, 115]. Суть его заключается в обнаружении в установившихся сигналах ВМП гармоник от ФОР, частоты которых могут быть определены по выражению (1.3). При возникновении обрыва амплитуды этих гармоник существенно возрастают, что и служит диагностическим признаком наличия дефекта. В качестве примера на рис. 3.52 приведен спектр ВМП ДАЗО-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем ОР при номинальной нагрузке, на котором показаны гармоники от ФОР первых пяти порядков.

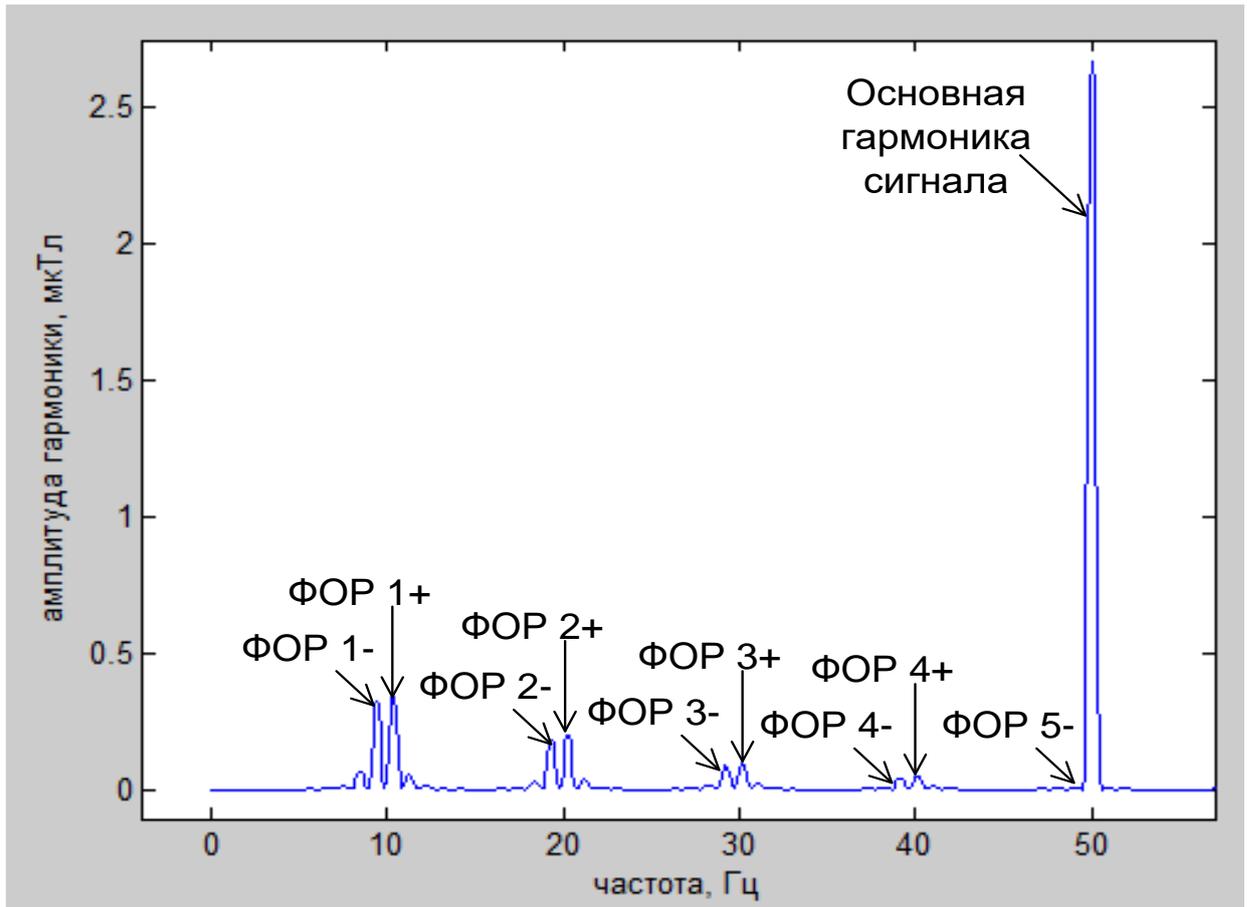


Рис. 3.52. Спектр ВМП на модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с 1 оборванным стержнем в установившемся режиме работы

Таблица 3.4. Амплитуды гармоник от ФОР первых пяти порядков в сигнале ВМП в установившемся режиме работы на модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 в режиме холостого хода

Наименование гармоники	Амплитуда гармоники при исправной ОР	Амплитуда гармоники при наличии одного оборванного стержня ОР	Соотношение амплитуды гармоники от ФОР при наличии и отсутствии обрыва
ФОР1- и ФОР1+ (сливаются в спектре)	0,01	0,08	8
ФОР2- и ФОР2+ (сливаются в спектре)	0,0056	0,054	9,64
ФОР3- и ФОР3+ (сливаются в спектре)	0,0019	0,023	12,1
ФОР4- и ФОР4+ (сливаются в спектре)	0,00075	0,008	10,67
ФОР5+ (основная гармоника сигнала) и ФОР 5-	2,818	2,822	1,001

Таблица 3.5. Амплитуды гармоник от ФОР первых пяти порядков в сигнале ВМП в установившемся режиме работы на модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 с нагрузкой, составляющей 50% от номинальной

Наименование гармоники	Амплитуда гармоники при исправной ОР	Амплитуда гармоники при наличии одного оборванного стержня ОР	Соотношение амплитуды гармоники от ФОР при наличии и отсутствии обрыва
ФОР1-	0,0167	0,247	14,79
ФОР2-	0,0022	0,1493	67,86
ФОР3-	0,00061	0,067	109,84
ФОР4-	0,00026	0,0296	113,85
ФОР5-	0,00003	0,0011	36,67
ФОР1+	0,0138	0,2602	18,86
ФОР2+	0,0014	0,1548	110,57
ФОР3+	0,0017	0,073	42,94
ФОР4+	0,0003	0,0316	105,33
ФОР5+ (основная гармоника сигнала)	2,779	2,783	1,001

Таблица 3.6. Амплитуды гармоник от ФОР первых пяти порядков в сигнале ВМП в установившемся режиме работы на модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 с номинальной нагрузкой

Наименование гармоники	Амплитуда гармоники при исправной ОР	Амплитуда гармоники при наличии одного оборванного стержня ОР	Соотношение амплитуды гармоники от ФОР при наличии и отсутствии обрыва
ФОР1-	0,01223	0,3576	29,24
ФОР2-	0,00142	0,1819	128,1
ФОР3-	0,00047	0,0857	182,34
ФОР4-	0,0002	0,039	195
ФОР5-	0,000019	0,0021	110,53
ФОР1+	0,01188	0,3698	31,13
ФОР2+	0,00067	0,2008	299,7
ФОР3+	0,00041	0,0969	236,34
ФОР4+	0,00014	0,0465	332,14
ФОР5+ (основная гармоника сигнала)	2,705	2,705	1

Результаты оценки амплитуд гармоник, а также их сравнения для моделей двигателя с исправной ОР и при наличии одного оборванного стержня приведены в таблицах 3.4-3.6 на холостом ходу, при 50% от номинальной нагрузки и при номинальной нагрузке соответственно. Представленные результаты также подтверждают выводы, сделанные при анализе соотношения амплитуд в сигнале тока статора в установившемся режиме работы. В режиме холостого хода невозможно различить гармоники от ФОР на нижней и верхней боковых частотах

из-за малого скольжения, поэтому они не могут являться надежным критерием наличия повреждения. Причиной роста амплитуд этих гармоник может являться не обрыв стержней ОР, а ДЭ. Кроме того, даже на математической модели соотношение между искомыми гармониками при наличии и отсутствии обрыва стержня составляет около 10. При 50% нагрузке АД получились удовлетворительные результаты, но значительно хуже, чем при номинальной нагрузке, где рассматриваемый метод обладает высокой чувствительностью к обрыву стержня. Особенно заметно это для амплитуд гармоник от ФОР первого порядка (ФОР 1- и ФОР 1+). Аналогичные выводы сделаны и в [98].

3.7.4. Оценка чувствительности разработанного метода на основе определения амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора в спектре внешнего магнитного поля при пуске

Результаты расчета амплитуд гармоник, а также их сравнения для моделей двигателя с исправной ОР и при наличии одного оборванного стержня приведены в таблице 3.7. Для упрощения измерения проведены на участке спектра, где гармоники от ФОР не сливаются друг с другом.

Таблица 3.7. Амплитуды гармоник от ФОР первых пяти порядков в сигнале ВМП в процессе пуска на модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1

Наименование гармоники	Амплитуда гармоники при исправной ОР	Амплитуда гармоники при наличии одного оборванного стержня ОР	Соотношение амплитуды гармоники от ФОР при наличии и отсутствии обрыва
ФОР1-	0,000241	0,08413	349,1
ФОР2-	0,0004338	0,08235	189,8
ФОР3-	0,000152	0,05104	335,8
ФОР4-	- (неразличима в спектре)	0,02525	-
ФОР5-	- (неразличима в спектре)	0,01716	-
ФОР1+	0,000104	0,08842	850,2
ФОР2+	0,0001705	0,06828	400,6
ФОР3+	0,000181	0,04007	221,4
ФОР4+	0,000062	0,02299	370,8
ФОР5+ (50 Гц)	2,353	2,24	1,05

3.7.5. Оценка чувствительности разработанного метода на основе определения амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора р- в спектре тока статора при пуске

Результаты расчета амплитуды гармоник от ФОР 5- в процессе пуска на модели АД с исправной ОР и АД с одним оборванным стержнем ОР приведены в таблице 3.8. Из результатов расчета видно, что в течение всего процесса пуска соотношение амплитуд гармоник поврежденного и исправного двигателя составляет не менее 79. В начальные моменты времени пуска (1 и 2 секунды) определение амплитуды для исправного АД затруднительно, поскольку на амплитуду оказывает влияние основная гармоника сигнала. Среднее значение соотношения амплитуд в процессе пуска по результатам расчета составляет 118,28. Амплитуда основной гармоник сигнала тока статора в процессе пуска составляет около 380 А.

Таблица 3.8. Амплитуда гармоник от ФОР 5- в сигнале тока статора в процессе пуска на модели АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1

Время, с	Амплитуда для АД с одним оборванным стержнем	Амплитуда для АД с исправной обмоткой ротора	Соотношение амплитуд для поврежденного и исправного АД
1	1,121	-	-
2	1,121	-	-
3	1,133	0,008064	140,5
4	1,095	0,0138	79,35
5	1,108	0,008146	136,02
6	1,065	0,01201	88,68
7	1,029	0,01216	84,62
8	0,986	0,00752	131,12
9	0,871	0,003808	228,72
10	0,67	0,007611	88,03
11	0,4818	0,004061	118,64
12	0,8755	0,01072	81,67
13	0,8096	0,006833	118,48
14	0,7406	0,005993	123,58

Примечание: под временем в таблице понимается время от начала момента пуска АД

3.7.6. Сравнение чувствительности рассмотренных методов контроля технического состояния

Сравнение чувствительности разработанных методов производится путем сравнения соотношений значений диагностических параметров при наличии и отсутствии наличия одного оборванного стержня. Для удобства сравнения все полученные результаты сведены в таблицу 3.9 для сигналов тока статора за исключением режима холостого хода, где различить гармонические составляющие от ФОР невозможно, и в таблицу 3.10 для сигналов ВМП. Из представленных в таблице результатов отчетливо видно, что разработанные методы являются более чувствительными по сравнению с уже существующими, что подтверждает их высокую эффективность при выявлении обрывов стержней короткозамкнутой ОР высоковольтных АД СН с длительным пуском. Также подтверждено, что при малой нагрузке АД чувствительность методов контроля в установившемся режиме становится значительно ниже, что не позволяет эффективно их использовать для выявления оборванных стержней у высоковольтных АД СН электростанций с тяжелыми условиями пуска, нагрузка которых обычно составляет около 55-80%.

Таблица 3.9. Сравнение методов контроля АД на модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 по сигналу тока статора

Метод контроля	Соотношение величин диагностических параметров при наличии обрыва одного стержня ОР и отсутствии дефекта
Брюханов Г.А., Князев С.А. (по разнице пиковых значений за период при пуске)	3,43
MCSA (по амплитуде гармоники от ФОР р- по току статора в установившемся режиме) при номинальной нагрузке АД	18,305
MCSA (по амплитуде гармоники от ФОР р- по току статора в установившемся режиме) при нагрузке АД, составляющей 50% от номинальной	5,667
Разработанный метод (по амплитуде гармоники от ФОР р- при пуске)	118,28

Таблица 3.10. Сравнение методов контроля АД на модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 по сигналу ВМП

Метод контроля		Соотношение величин диагностических параметров при наличии обрыва одного стержня ОР и отсутствии дефекта
Voitto Kokko, Новоселов Е.М... (по амплитудам гармоник от ФОР первых порядков по ВМП в установившемся режиме) при номинальной нагрузке АД	ФОР 1-	29,24
	ФОР 2-	128,1
	ФОР 3-	182,34
	ФОР 1+	31,13
	ФОР 2+	299,7
	ФОР 3+	236,34
Voitto Kokko, Новоселов Е.М... (по амплитудам гармоник от ФОР первых порядков по ВМП в установившемся режиме) при нагрузке АД, составляющей 50% от номинальной	ФОР 1-	14,79
	ФОР 2-	67,86
	ФОР 3-	109,84
	ФОР 1+	18,86
	ФОР 2+	110,57
	ФОР 3+	42,94
Voitto Kokko, Новоселов Е.М... (по амплитудам гармоник от ФОР первых порядков по ВМП в установившемся режиме) в режиме холостого хода АД	ФОР 1- и ФОР 1+	8
	ФОР 2- и ФОР 2+	9,64
	ФОР 3- и ФОР 3+	12,1
Разработанный метод (по амплитудам гармоник от ФОР первых порядков по ВМП при пуске)	ФОР 1-	349,1
	ФОР 2-	189,8
	ФОР 3-	335,8
	ФОР 1+	850,2
	ФОР 2+	400,6
	ФОР 3+	221,4

3.8. Оценка помехозащищенности сигнала внешнего магнитного поля высоковольтных асинхронных двигателей на электрических станциях

Вопросы оценки помехозащищенности диагностического сигнала, в качестве которого может выступать ВМП АД, для электрических станций имеют очень большое значение. Первоначальные исследования в этой области представлены в [98]. В этой работе показано, что магнитное поле соседних высоковольтных АД, находящихся в работе, не может оказать никакого влияния на проведение контроля на исследуемом двигателе. Исследования были

проведены как на математической модели АД, так и в ходе исследований на электрической станции (ТЭЦ-2 города Иваново).

Однако исследования, описанные в [98], выполнены в соответствии с расположением АД на ТЭЦ-2, где соседние АД расположены находятся на большом расстоянии друг от друга (5 метров). На других же электрических станциях расстояние между АД может быть значительно меньше, что может привести к возникновению влияния соседних АД на результаты контроля технического состояния ОР. Например, на рис. 3.53 показано взаимное расположение АД дутьевых вентиляторов на ТЭЦ-3 города Иваново, а на рис. 3.54 – план расположения АД механизмов тягодутьевого тракта на этой электростанции. Как видно из представленного плана, расстояние между соседними АД дутьевых вентиляторов на станции составляет всего 1 м.

Также следует отметить, что в ходе работы исследовалось затухание в первую очередь основной гармоники сигнала (50 Гц). Однако во ВМП гармонические составляющие от ФОР низких порядков могут иметь соизмеримые амплитуды с основной гармоникой сигнала. Амплитуды подобных гармонических составляющих при удалении датчика от корпуса АД затухают значительно слабее, чем основная гармоника сигнала (поскольку частота таких гармоник значительно ниже 50 Гц).

Наконец, проведенные в [98] исследования выполнены на АД типа ДАМСО-15-12-8, корпус которого изготовлен из немагнитного материала. При этом затухание гармоник при удалении от стального корпуса АД может иметь иной вид, что также требует проведения исследования.

Таким образом, в ходе работы поставлена задача произвести исследование затухания гармонических составляющих от ФОР первых порядков в сигнале радиальной составляющей ВМП на математической модели высоковольтного АД электростанции с длительным пуском при удалении датчика от его стального корпуса на расстояние до 1 метра, чтобы оценить возможность проведения контроля при пуске АД с учетом возможного влияния магнитного поля соседнего работающего электродвигателя.

Исследования проведены на математических моделях АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 с отсутствием дефектов, при наличии от 1 до 6 оборванных стержней и при наличии ДЭ, величина которого составляла 20% от величины воздушного зазора, а также при наличии обоих видов неисправностей.



Рис. 3.53. Взаимное расположение АД на электростанции (ТЭЦ-3 города Иваново)

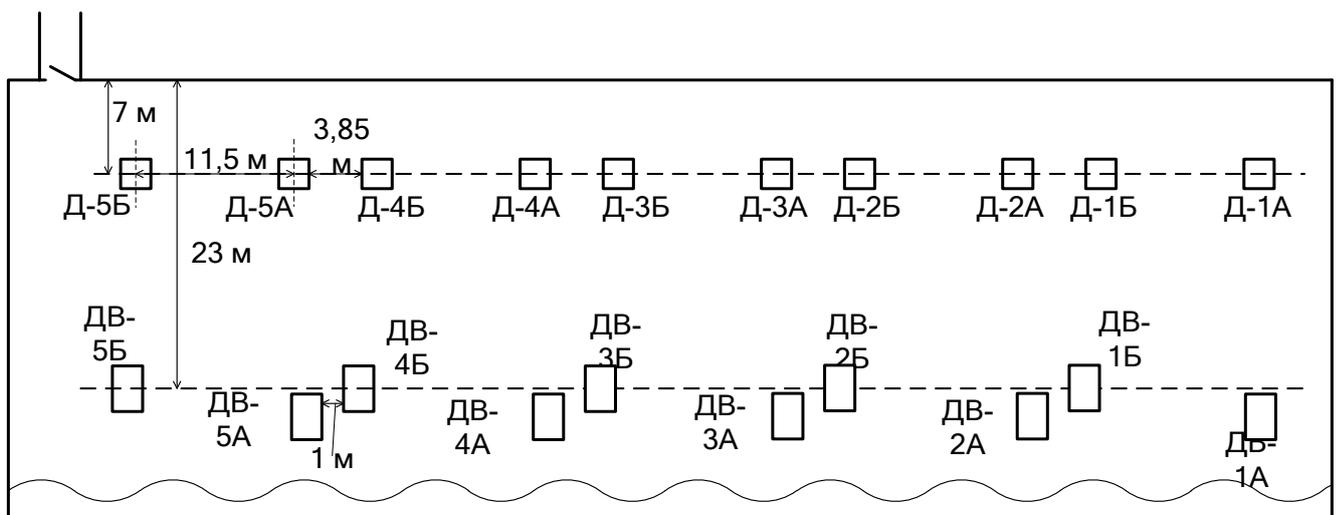


Рис. 3.54. План расположения АД механизмов тягодутьевого тракта на ТЭЦ-3 города Иваново

В ходе исследования было показано, что, независимо от вида дефекта АД, характер изменения гармоник от ФОР от расстояния до корпуса не изменяется. На рис. 3.55 и 3.56 приведены графики изменения амплитуд гармоник от ФОР на нижней и верхней боковых частотах соответственно в относительных единицах (относительно амплитуды на корпусе АД) в зависимости от расстояния до корпуса АД. Из представленных графиков отчетливо видно, что при увеличении расстояния до корпуса АД амплитуды гармоник значительно снижаются. Так, на расстоянии 2 метров от корпуса амплитуды гармоник могут снижаться в 100 и более раз. Наименьшее падение амплитуды характерно для гармоник от ФОР первого порядка (ФОР 1- и ФОР 1+), однако даже для нее характерно падение амплитуды более чем в 10 раз.

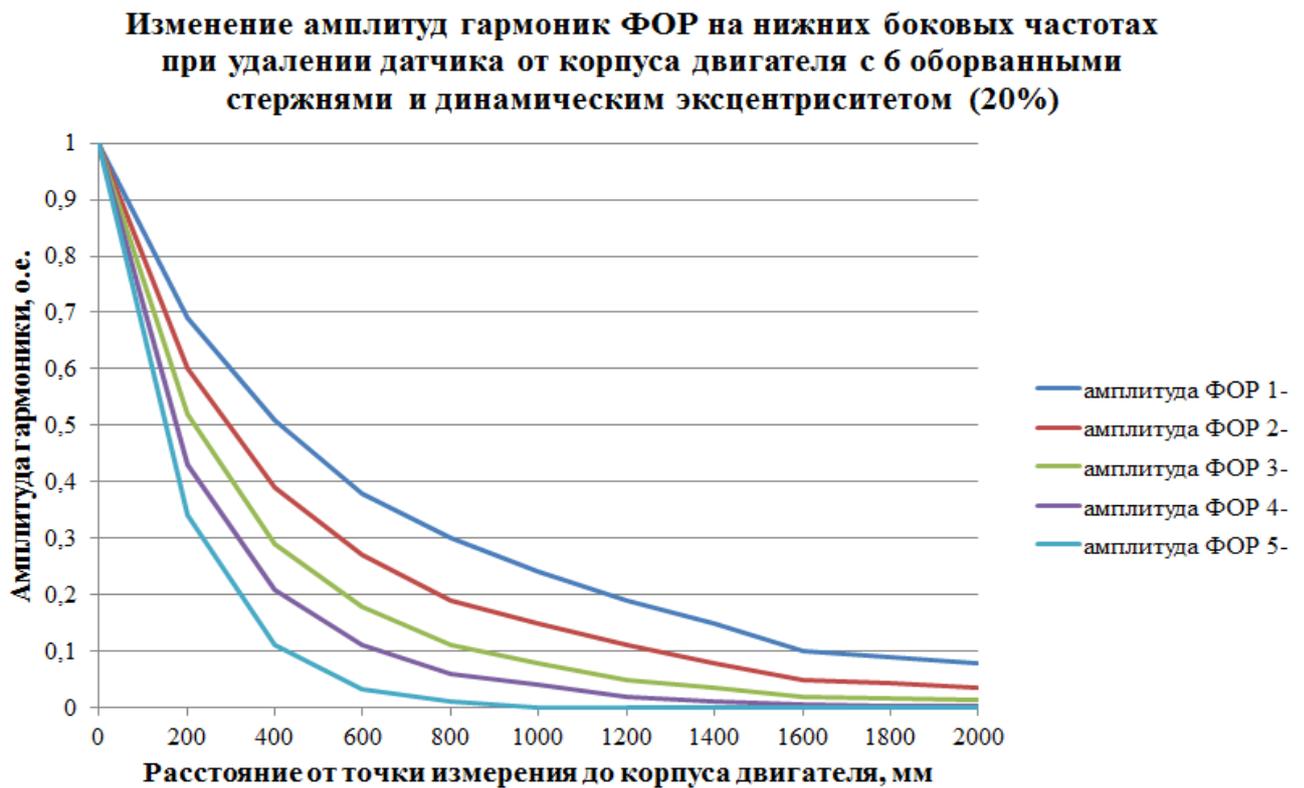


Рис. 3.55. Изменение амплитуд гармоник от ФОР на нижних боковых частотах в о.е. при удалении точки измерения от корпуса АД

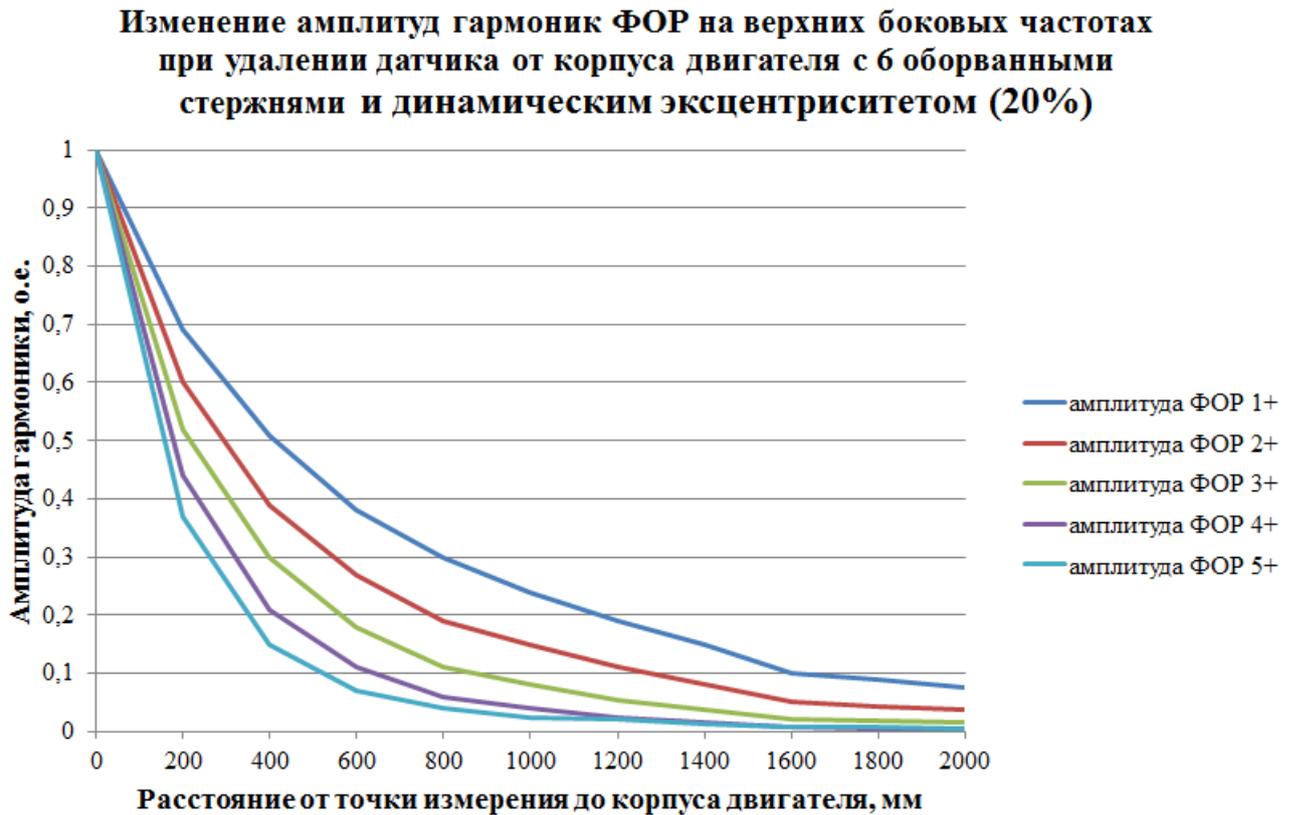


Рис. 3.56. Изменение амплитуд гармоник от ФОР на верхних боковых частотах в о.е. при удалении точки измерения от корпуса АД

Таким образом, при отсутствии или наличии малого количества стержней (до 5) даже при малых расстояниях между АД поле соседнего двигателя практически не оказывает влияние на рассматриваемый сигнал. В ходе исследований было показано, что существенное влияние на ЧВС высоковольтных АД СН могут оказать лишь соседние двигатели при наличии большого количества оборванных стержней (5 и более), что связано с очень высокими амплитудами гармоник от ФОР первых порядков (более 3 мкТл). Для примера на рис. 3.57 и 3.58 приведены значения амплитуд гармоник от ФОР в мкТл при удалении точки измерения от корпуса АД с 6 оборванными стержнями ОР при его работе с номинальной нагрузкой, а в таблице 3.11 – их численные значения. Из представленных графиков видно, что амплитуды гармоник от ФОР первого порядка составляют более 0,35 мкТл при удалении на 2 метра в радиальном направлении и более 1 мкТл при удалении на 1 м (то есть на расстоянии между АД дутьевых вентиляторов на ТЭЦ-3). При этом в предыдущих разделах было

показано, что амплитуды гармоник в низкочастотной части спектра АД с одним оборванным стержнем достигают всего 0,25 мкТл.

Таблица 3.11. Влияние расстояния от корпуса АД с обрывом 6 стержней ОР на амплитуды гармоник от ФОР во ВМП

Расстояние	A _{ФОР1-}	A _{ФОР2-}	A _{ФОР3-}	A _{ФОР4-}	A _{ФОР5-}	A _{ФОР1+}	A _{ФОР2+}	A _{ФОР3+}	A _{ФОР4+}	A _{ФОР5+}
0 (корпус)	4,714	2,55	1,19	0,5376	0,133	5,622	3,102	1,4986	0,7202	2,889
200	3,21	1,5222	0,614	0,235	0,0456	3,824	1,8506	0,7606	0,3172	1,1018
400	2,374	1,0056	0,356	0,1172	0,016	2,830	1,2232	0,4412	0,1598	0,4836
600	1,752	0,6583	0,201	0,0546	0,0037	2,008	0,8013	0,2496	0,0771	0,2057
800	1,437	0,509	0,1506	0,0388	-	1,713	0,6292	0,1896	0,0549	0,1396
1000	1,119	0,3725	0,0987	0,0225	-	1,334	0,4538	0,1251	0,0343	0,0918
1200	0,8666	0,2635	0,0612	0,0113	-	1,033	0,3211	0,0779	0,0192	0,0546
1400	0,6838	0,1922	0,0414	0,0065	-	0,8151	0,2378	0,0527	0,0117	0,0356
1600	0,481	0,126	0,0234	0,0027	-	0,5733	0,1535	0,0297	0,0053	0,0203
1800	0,4158	0,1082	0,02	-	-	0,4956	0,1318	0,0251	0,004	0,0155
2000	0,3531	0,0917	0,0171	-	-	0,4209	0,1116	0,0213	0,0029	0,0107

Изменение амплитуд гармоник ФОР на нижних боковых частотах при удалении датчика от корпуса двигателя с 6 оборванными стержнями

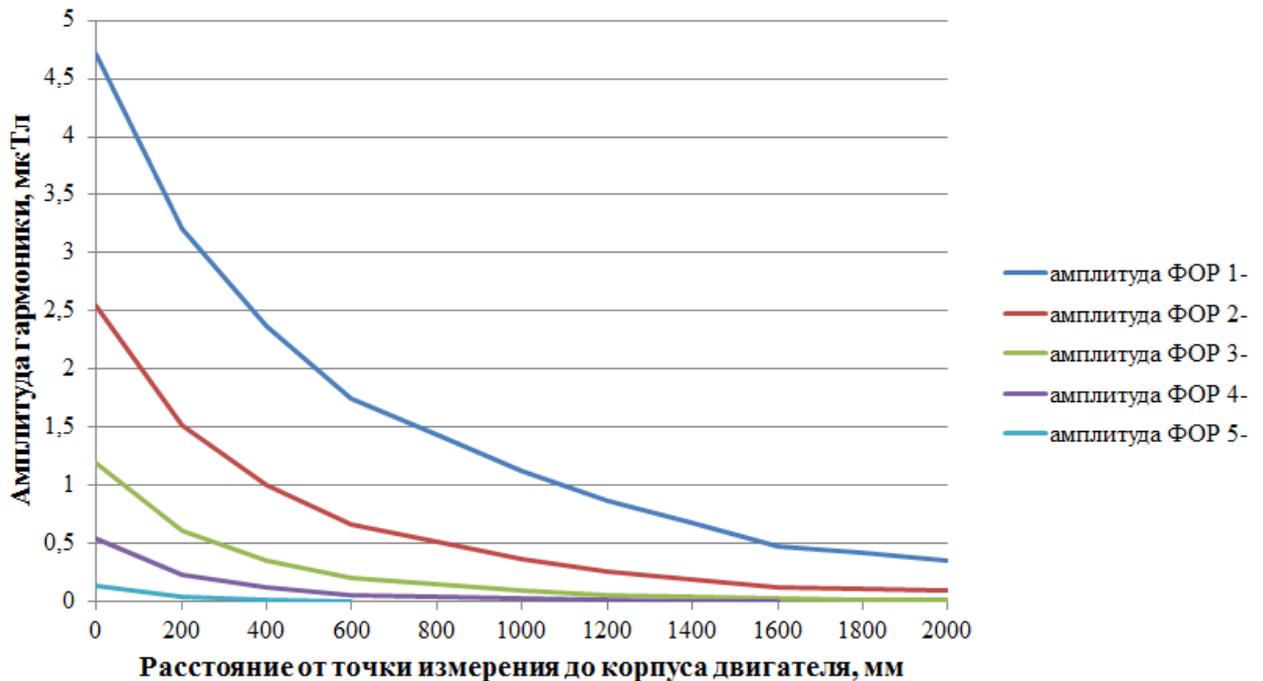


Рис. 3.57. Изменение амплитуд гармоник от ФОР на нижних боковых частотах в мкТл при удалении точки измерения от корпуса АД с обрывом 6 стержней ОР

Изменение амплитуд гармоник ФОР на верхних боковых частотах при удалении датчика от корпуса двигателя с 6 оборванными стержнями

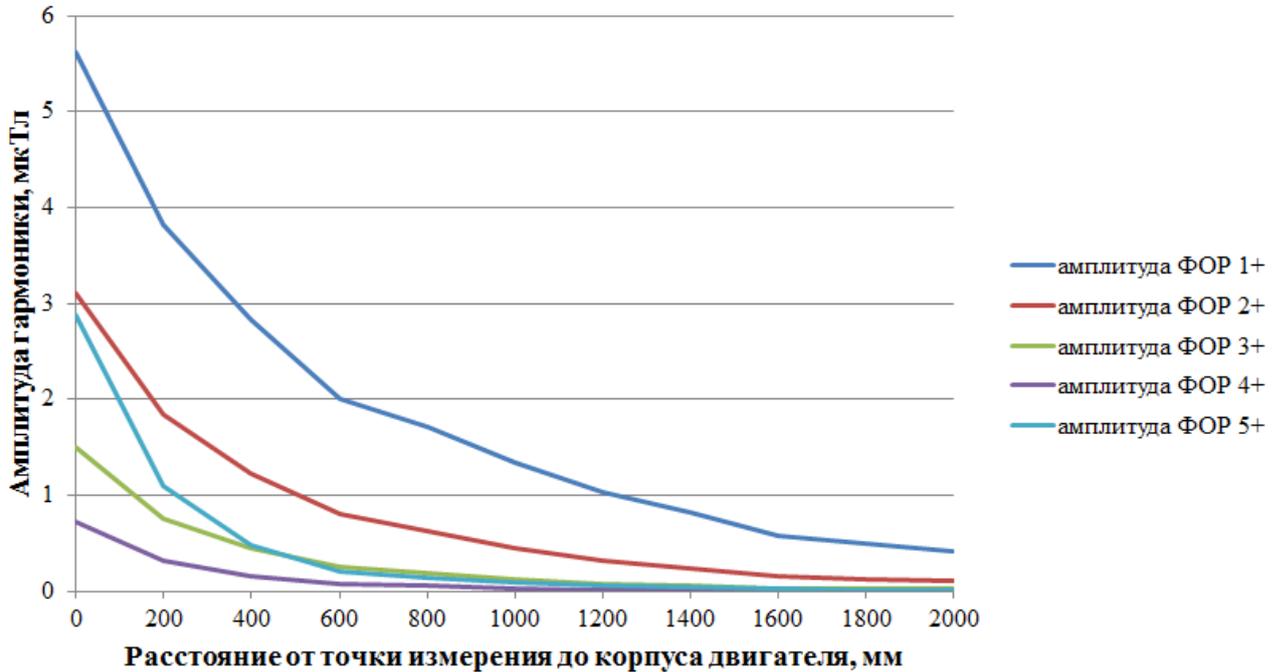


Рис. 3.58. Изменение амплитуд гармоник от ФОР на верхних боковых частотах в мкТл при удалении точки измерения от корпуса АД с обрывом 6 стержней ОР

Из представленных результатов видно, что при работе соседних АД с большим количеством оборванных стержней (более 5) в спектре исследуемого АД могут появляться низкочастотные гармоники с высокими амплитудами. Однако их частоты в процессе пуска исследуемого высоковольтного АД не будут изменяться, а будут иметь постоянные значения, определяемые по выражению (1.3). Поэтому появление гармоник с постоянной частотой (за исключением 50 Гц) в низкочастотной области ЧВС пускового сигнала АД может свидетельствовать о наличии повреждений на соседних АД и не может привести к ошибочному заключению о наличии дефекта на исследуемой машине.

Таким образом, можно отметить, что даже при большом количестве оборванных стержней на соседних АД, расположенных близко друг к другу (на расстоянии 1-2 м), проведение контроля в пусковом режиме остается возможным. В то же время наличие большого количества оборванных стержней на соседних АД при проведении контроля по радиальной составляющей ВМП в

установившемся режиме работы [98] может привести к ошибочному выводу о наличии обрывов на исследуемой машине.

Выводы по главе 3

1. Разработаны модели двух высоковольтных АД: двухскоростного АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 с одной ОР и АД типа ДАМСО-15-12-8 с двойной беличьей клеткой, являющихся приводами механизмов СН электрических станций. Подтверждена корректность этих моделей путем сравнения их паспортных данных с полученными в ходе расчета на математической модели режимными параметрами.

2. На математических моделях показано, что амплитуды гармоник от ФОР первых порядков могут служить диагностическим параметром повреждения ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска, а диагностическим признаком – их резкое возрастание. При этом наиболее отчетливо проявляются гармоники в области от 0 до 50 Гц.

3. Хотя частоты гармоник ДЭ совпадают с частотами гармоник от ФОР, в пусковом режиме для высоковольтных мощных АД они практически не могут оказать влияния на спектр ВМП, поскольку амплитуды гармоник ДЭ при пуске во много раз меньше, чем в установившихся режимах. Поэтому при проведении контроля в пусковых режимах могут быть использованы не только гармоники от ФОР на нижних боковых частотах, но и гармоники на верхних боковых частотах (за исключением гармоники с частотой 50 Гц).

4. На математических моделях подтверждено, что в сигнале тока статора удобным диагностическим параметром повреждения ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска является возрастание амплитуды отраженной гармоники от ФОР порядка, совпадающего с числом пар полюсов, а диагностическим признаком – резкое возрастание амплитуды этой гармоники.

5. Разработаны методы контроля состояния ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска на основе спектрального анализа пусковых сигналов

ВМП и тока статора, основанные на определении амплитуд характерных гармонических составляющих от ФОР в ЧВС указанных сигналов. Обработка сигналов осуществляется с помощью алгоритма, описанного в главе 2.

6. Доказана возможность проведения экспериментальных исследований на низковольтных АД с кратковременным пуском путем подачи на двигатель пониженного напряжения (в несколько раз ниже номинального). При этом в спектрах ВМП и тока статора также можно обнаружить гармоники от ФОР при наличии обрыва стержня ОР. Показано, что при проведении экспериментальных исследований в качестве признака наличия обрыва стержней ОР могут выступать только гармоники от ФОР на нижних боковых частотах, которые отражаются в ЧВС от оси времени.

7. Доказана более высокая чувствительность разработанных методов по сравнению с наиболее эффективными из существующих на настоящий момент методами контроля технического состояния ОР путем сравнения диагностических признаков при наличии и отсутствии оборванных стержней на математической модели высоковольтного АД СН.

8. Несмотря на то, что при малом расстоянии между двумя высоковольтными АД на электростанциях наличие большого количества оборванных стержней (более 5) на соседнем АД может привести к появлению в сигнале радиальной составляющей ВМП исследуемого двигателя низкочастотных гармонических составляющих от ФОР первых порядков с высокими амплитудами, это не может привести к ошибочному заключению о наличии повреждения ОР при проведении контроля разработанным методом по ВМП в режиме пуска.

Материалы третьей главы опубликованы в работах [127-129, 131-136, 139, 141-143, 145, 146].

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА СТАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ПУСКОМ

4.1. Постановка задачи

Проведенное исследование спектров ВМП и тока статора в пусковом режиме на компьютерных моделях высоковольтных АД СН, приведенное в главе 3, показало возможность контроля состояния обрывов стержней ОР путем выявления в спектре гармонических составляющих от ФОР. Кроме того, показана и возможность проведения экспериментальных исследований на низковольтных двигателях с малым времени пуска путем подачи пониженного напряжения.

Однако при анализе сигналов реальных АД ЧВС могут существенно отличаться от идеальных, полученных на математических моделях. Это может быть связано с возможной несимметрией самой ОР, практически всегда присутствующей у АД (в частности, различные сопротивления стержней ОР), влиянием подключенного в качестве нагрузки механизма, вибрацией самого АД и т.д. В связи с этим необходимо оценить, насколько эффективными будут методы при проведении исследований на низковольтном электродвигателе с искусственно затянутым пуском путем подачи пониженного напряжения, а также при проведении контроля технического состояния АД на реальных высоковольтных АД СН электростанций с тяжелыми длительными пусками.

В связи с этим в этой главе поставлены следующие задачи:

- 1) Проведение исследований на экспериментальном стенде. Сравнение ЧВС сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля при длительном пуске АД типа АИР 71А6 при подаче пониженного напряжения при установке исправного ротора и ротора с одним оборванным стержнем;

- 2) Сравнение ЧВС при пуске реальных АД, исследуемых на лабораторном стенде, и их математических моделей;
- 3) Разработка методики оценки технического состояния ОР высоковольтных АД СН на основе проведенных исследований;
- 4) Исследование спектров реальных высоковольтных АД СН с длительным пуском на электростанциях.

4.2. Совершенствование экспериментального стенда для проведения исследований сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля на низковольтном асинхронном электродвигателе

В [98] был разработан экспериментальный стенд, на котором производился анализ сигналов (в качестве которых выступали сигналы ВМП и внутреннего магнитного поля) в установившихся режимах работы. Однако данный экспериментальный стенд оказался непригоден для исследования сигналов в пусковых режимах работы, что в первую очередь связано с необходимостью подачи напряжения значительно ниже номинального. Также не осуществлялась регистрация тока статора. Поэтому первоначальной задачей при проведении экспериментальных исследований является модификация существующего экспериментального стенда для возможности получения и сравнения спектров сигналов тока статора, ВМП и внутреннего магнитного поля на реальном низковольтном АД с искусственно затянутым пуском.

Фотография разработанного экспериментального стенда, а также используемых в ходе работы средств измерений представлены на рис. 4.1. В качестве объекта исследования выступает АД типа АИР 71А6 (1) мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов, номинальной частотой вращения 900 об/мин, модель которого, разработанная в программном комплексе ANSYS, представлена в главе 3. Для регистрации сигналов ВМП использованы датчик Холла (2) и

наружный индуктивный датчик (НИД), представляющий собой П-образный разомкнутый магнитопровод с обмоткой, обладающий более высокой чувствительностью по сравнению с датчиком Холла (3). Для регистрации внутреннего магнитного поля использован внутренний индуктивный датчик, представляющий собой виток провода, намотанный на зубец двигателя внутри воздушного зазора. Для регистрации тока статора использован измерительный токовый шунт типа 75ШИП1-5-0.5 (4), внешний вид которого отдельно представлен на рис. 4.2. В качестве АЦП выступала звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 (5). Обработка зарегистрированного сигнала осуществлялась на персональном компьютере в программном комплексе Matlab с помощью разработанного в главе 2 алгоритма на основе ОПФ.

Для оценки параметров двигателя использован многофункциональный измерительный прибор ЩМ-120 (6). Сигналы могут быть зарегистрированы в 3 режимах с различными условиями пуска – без подключенного механизма, с установленным шкивом (7) и с подключенным с помощью ремня генератором переменного тока (8). Пуск АД осуществлялся при установке двух роторов, один из которых находился в исправном состоянии, а во втором высверлен один из стержней ОР. Как уже отмечалось ранее, для обработки сигнала с помощью ОПФ необходима длительность сигнала, составляющая хотя бы несколько секунд, а время пуска рассматриваемого АД очень мало (не превышает 0,2 секунды даже с подключенным генератором переменного тока). Поэтому регистрация осуществлялась при подаче на двигатель пониженного напряжения с помощью регулировочного трехфазного автотрансформатора (9) для увеличения времени и приближения условий пуска данного двигателя к реальным высоковольтным АД СН на электростанции. Подача напряжения осуществляется при включении автомата.

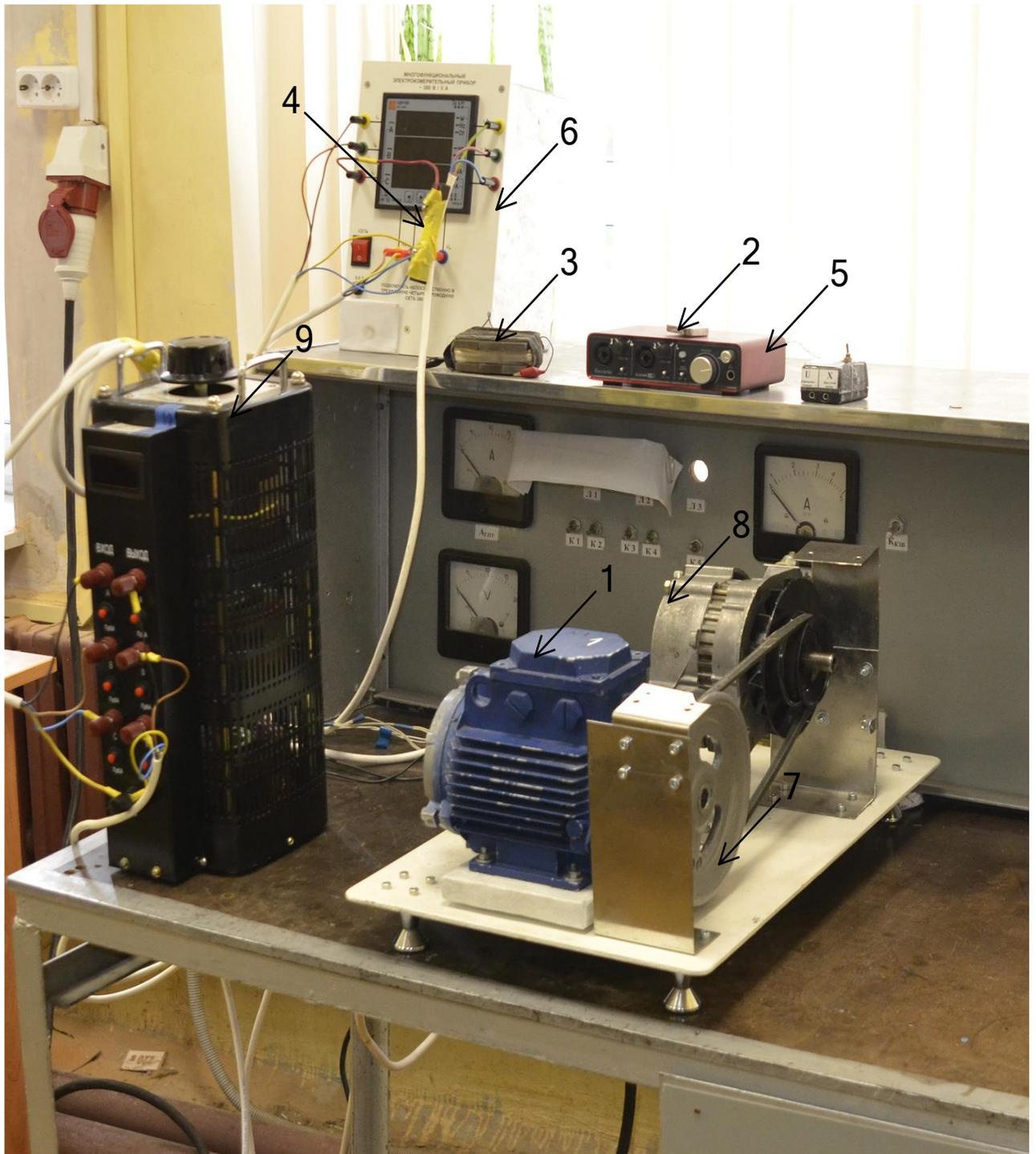


Рис. 4.1. Внешний вид разработанного экспериментального стенда: 1) АД типа АИР 71А6; 2) датчик Холла; 3) НИД; 4) измерительный токовый шунт 75ШИП1-5-0.5; 5) звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 (АЦП); 6) многофункциональный измерительный прибор ЩМ-120 7) шкив; 8) генератор переменного тока; 9) регулировочный автотрансформатор



Рис. 4.2. Внешний вид измерительного токового шунта 75ШИП1-5-0,5, использованного для измерения тока статора на экспериментальном стенде

4.3. Экспериментальное исследование влияния обрыва стержней обмотки ротора на частотно-временные спектры низковольтного асинхронного двигателя малой мощности при искусственном затягивании пуска

Первоначальной задачей при проведении экспериментальных исследований на низковольтном АД малой мощности является подбор необходимой величины питающего напряжения для максимально возможной продолжительности пуска АД, приближающей условия пуска рассматриваемого АД к условиям пуска высоковольтных АД СН электростанций. Для этих целей было исследовано влияние питающего напряжения на время пуска АД, а также на изменение режимных параметров.

Результаты исследований изменения времени пуска АД приведены в приложении 2, а результаты оценки режимных параметров работы АД на пониженном напряжении – в приложении 3. В ходе исследования было показано, что оптимальным режимом можно считать пуск АД на напряжении 30 В при установке на валу шкива, поскольку в этом режиме время пуска составляет около минуты, что позволяет легко обработать сигнал с помощью разработанного алгоритма. При этом следует отметить, при пуске на малых напряжениях (менее

50 В) амплитуда тока статора практически не меняется (приложение 3), поэтому пуск двигателя на более высоких напряжениях не рационален, так как амплитуда гармоник от ФОР практически не изменится. В связи с этим было принято решение производить контроль на более низком напряжении, чтобы достигнуть наибольшего возможного времени пуска без существенного уменьшения амплитуды характерных гармонических составляющих от ФОР, а именно при подаче напряжении около 30 В при установке шкива без подключенного генератора переменного тока.

4.3.1. Анализ влияния обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора на сигнал внутреннего магнитного поля реального асинхронного двигателя малой мощности при искусственно затянутом пуске

Первоначально было произведено исследование влияния обрывов стержней короткозамкнутой ОР АД на экспериментальном стенде на ЧВС сигнала внутреннего магнитного поля при пуске. Для регистрации сигнала использован внутренний индуктивный датчик, представляющий собой виток провода, намотанный на зубец АД. Необходимо также принять во внимание, что в спектре внутреннего магнитного поля проявляется значительно большее количество гармоник от ФОР. ЧВС строятся в диапазоне частот от 0 до 100 Гц. Полученные в ходе работы спектры представлены на рис. 4.3 и 4.4 для двух различных роторов (первый ротор содержит один оборванный стержень, второй без оборванных стержней). Для наглядности на рис. 4.5 и 4.6 представлены также частотные спектры в момент времени $t=55$ сек с начала пуска, близкий к окончанию пускового режима.

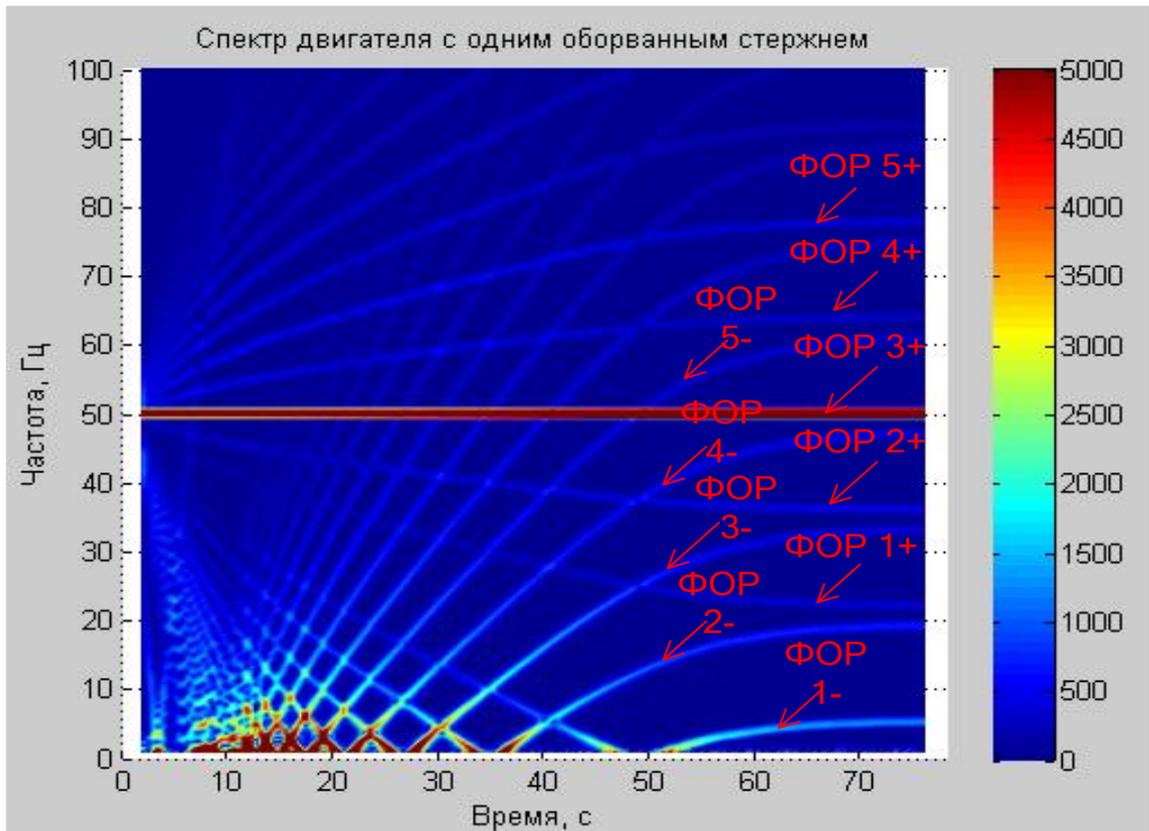


Рис. 4.3. ЧВС внутреннего магнитного поля АД на экспериментальном стенде с ротором №1 (1 оборванный стержень)

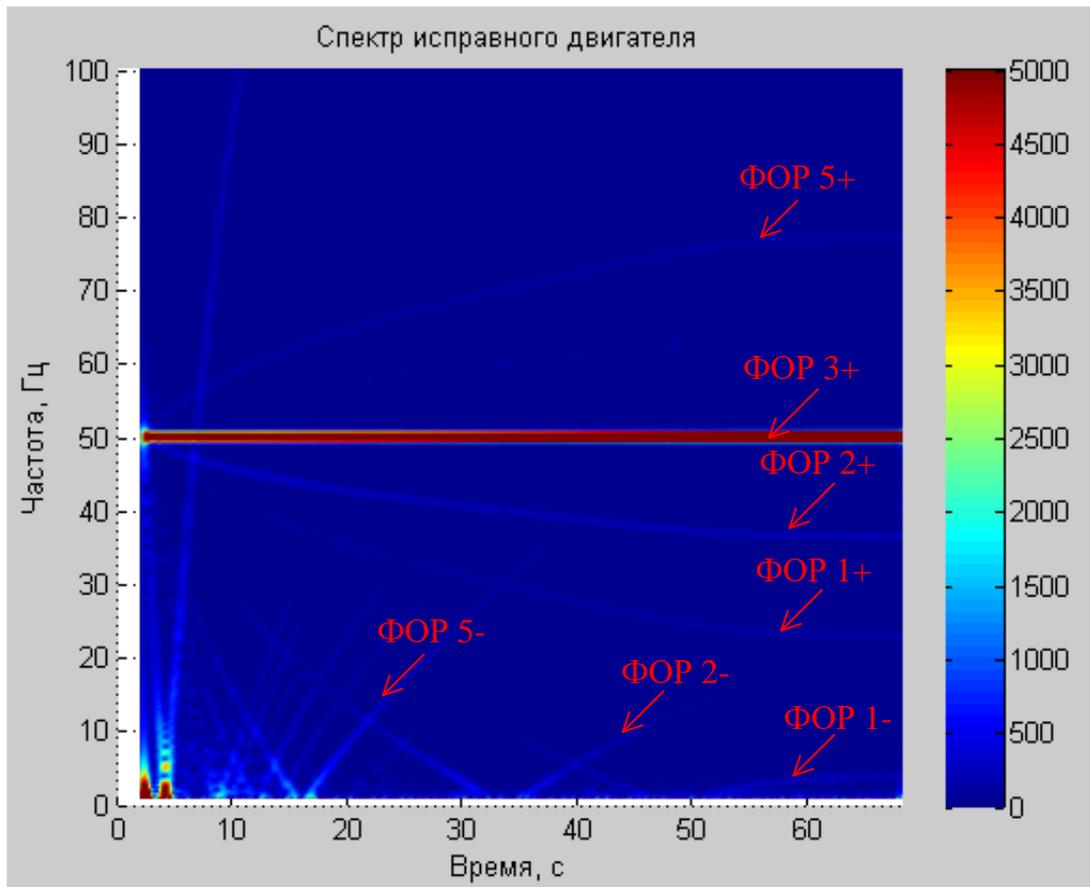


Рис. 4.4. ЧВС внутреннего магнитного поля АД на экспериментальном стенде с ротором №2 (без оборванных стержней)

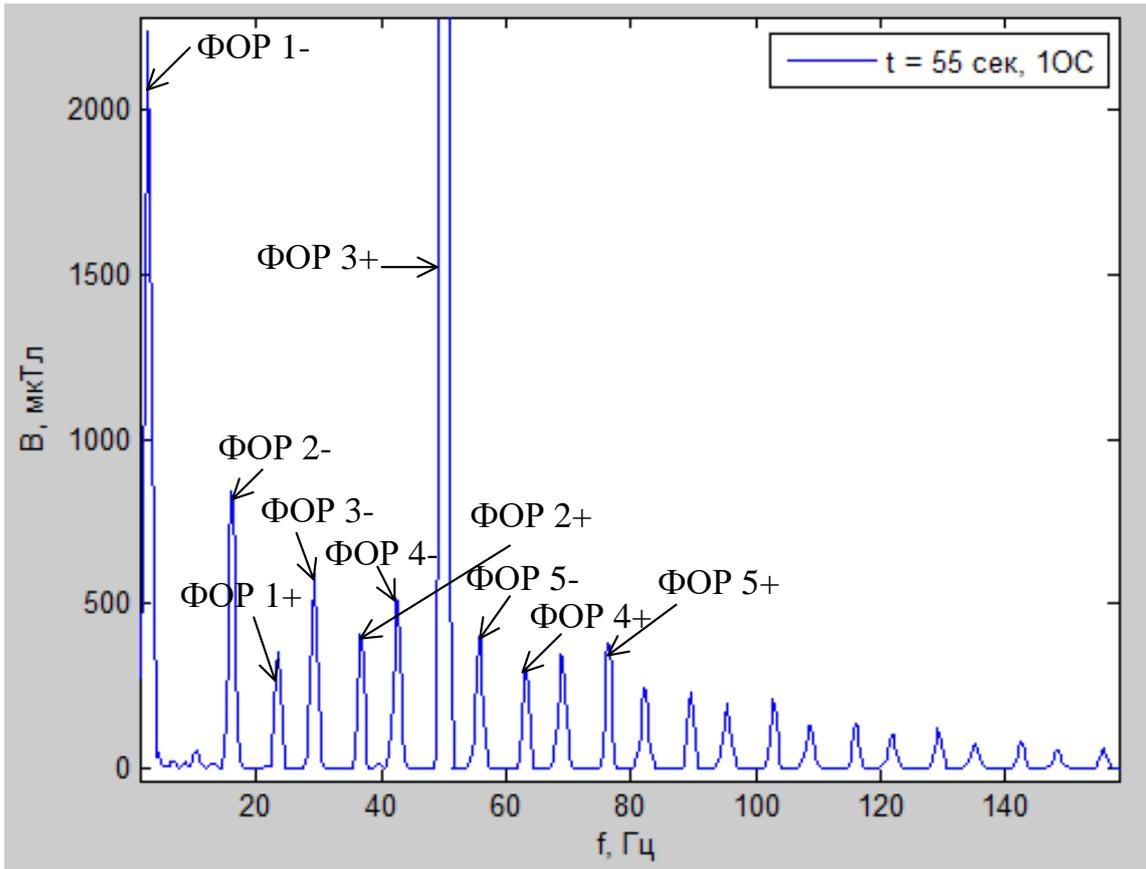


Рис. 4.5. Частотный спектр внутреннего магнитного поля АД на экспериментальном стенде с ротором №1 (1 оборванный стержень) в момент времени $t=55$ сек

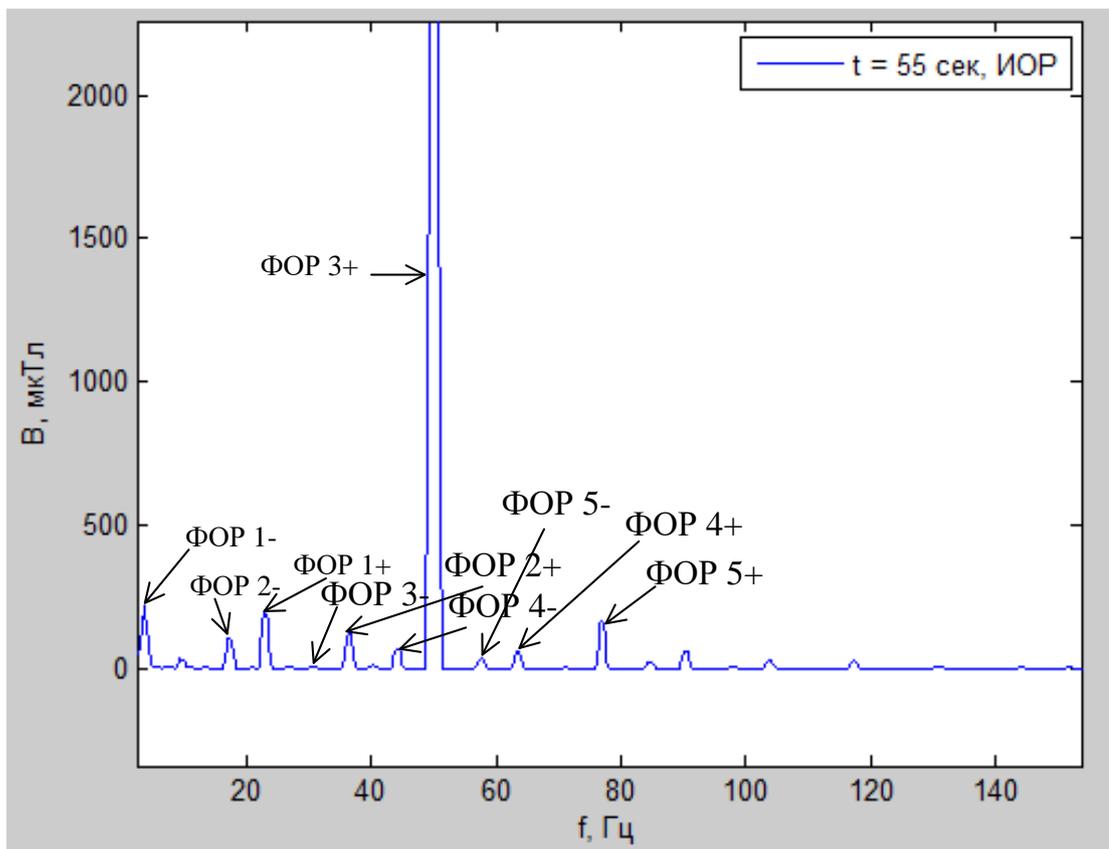


Рис. 4.6. Частотный спектр внутреннего магнитного поля АД на экспериментальном стенде с ротором №2 (без оборванных стержней) в момент времени $t=55$ сек

Из полученных спектров видно, что гармоники от ФОР отчетливо проявляются в обоих рассматриваемых случаях. Однако амплитуды этих гармоник при наличии оборванных стержней значительно превышают амплитуды гармоник от ФОР при отсутствии неисправности. Как видно из частотных спектров, амплитуды многих гармоник при наличии дефекта возросли на порядок. Это позволяет сделать вывод о том, что в сигнале внутреннего магнитного поля отчетливо проявляются диагностические признаки, характеризующие наличие обрыва стержней ОР.

4.3.2. Анализ влияния обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора на сигнал внешнего магнитного поля реального асинхронного двигателя малой мощности при искусственно затянутом пуске

После доказательства возможности обнаружения обрывов стержней ОР при пуске АД по внутреннему магнитному полю были произведены аналогичные исследования ВМП. Как было отмечено ранее, регистрация сигнала осуществлялась с помощью двух датчиков: датчика Холла и датчика НИД. В ходе исследований осуществлялась регистрация ВМП, датчики устанавливались в зоне середины длины сердечника статора. Как уже было показано ранее, при исследованиях ВМП большой интерес представляют гармоники от ФОР первых порядков, амплитуды которых значительно превышают амплитуды гармоник более высоких порядков, поэтому спектр также построен в диапазоне частот от 0 до 100 Гц.

Первоначально были получены спектры сигналов ВМП, зарегистрированных с помощью датчика Холла. Полученные в ходе работы спектры представлены на рис. 4.7 и 4.8 для АД с ротором с одним оборванным стержнем и с исправным ротором соответственно. Из полученных спектров отчетливо видно, что сигнал ВМП является менее чувствительным к наличию повреждений, чем сигнал внутреннего магнитного поля. При этом амплитуды некоторых гармонических составляющих от ФОР практически не изменились в

случаях наличия и отсутствия обрыва. Это можно объяснить влиянием механических дефектов АД или подключенного механизма, а также влиянием ДЭ, который может существенно исказить ЧВС гармоник от ФОР при подаче пониженного напряжения (как показано в 3 главе).

С другой стороны, из спектров отчетливо видно, что при обрыве стержней существенно возрастают амплитуды отраженных гармонических составляющих от ФОР, которые характеризуют наличие обрывов стержней короткозамкнутой ОР. Также можно заметить некоторый рост и амплитуд гармоник на высоких частотах, которые мало подвержены влиянию ДЭ. Однако амплитуды этих гармоник очень малы, поэтому они слабо различимы на фоне шумов при измерении с помощью датчика Холла, что связано с недостаточной чувствительностью имеющегося датчика. Поэтому было принято решение произвести измерения и при регистрации сигнала с помощью НИД.

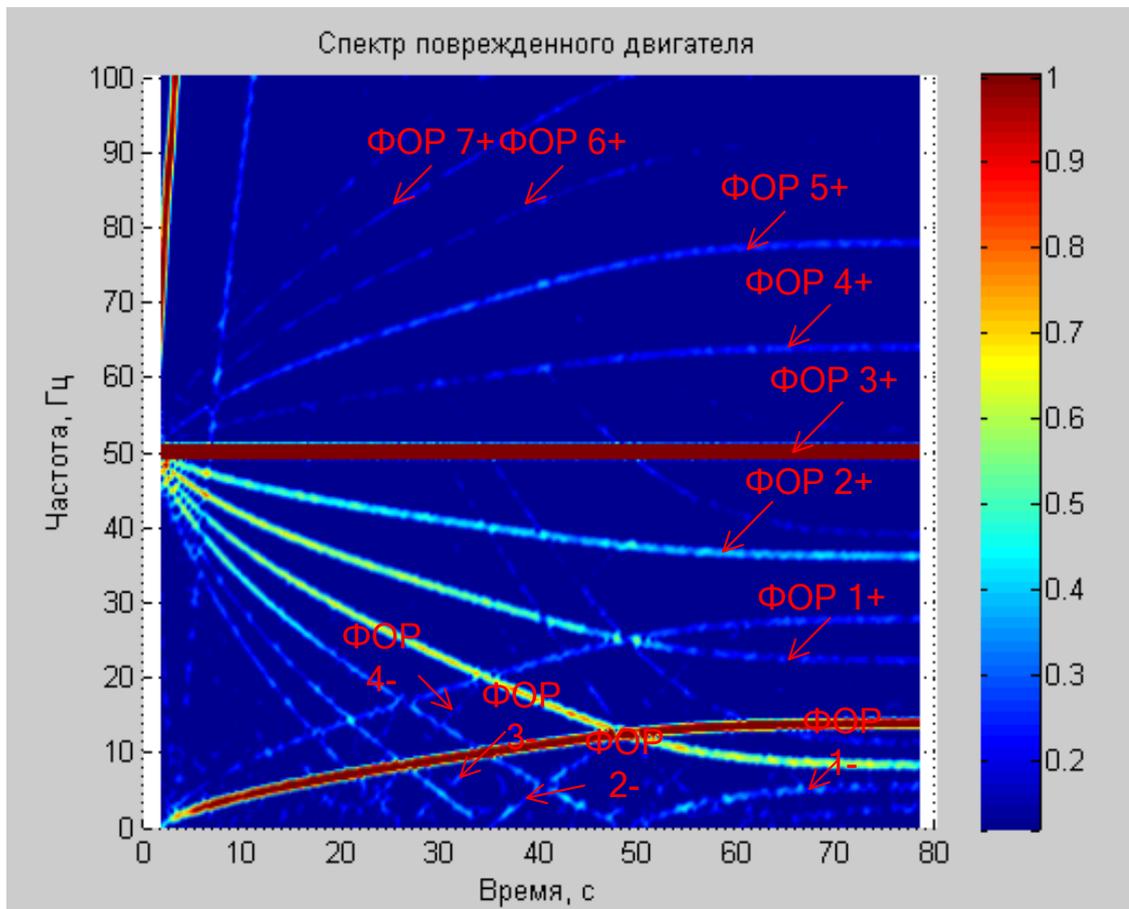


Рис. 4.7. ЧВС радиальной составляющей ВМП АД на экспериментальном стенде с ротором №1 (1 оборванный стержень), зарегистрированной с помощью датчика Холла

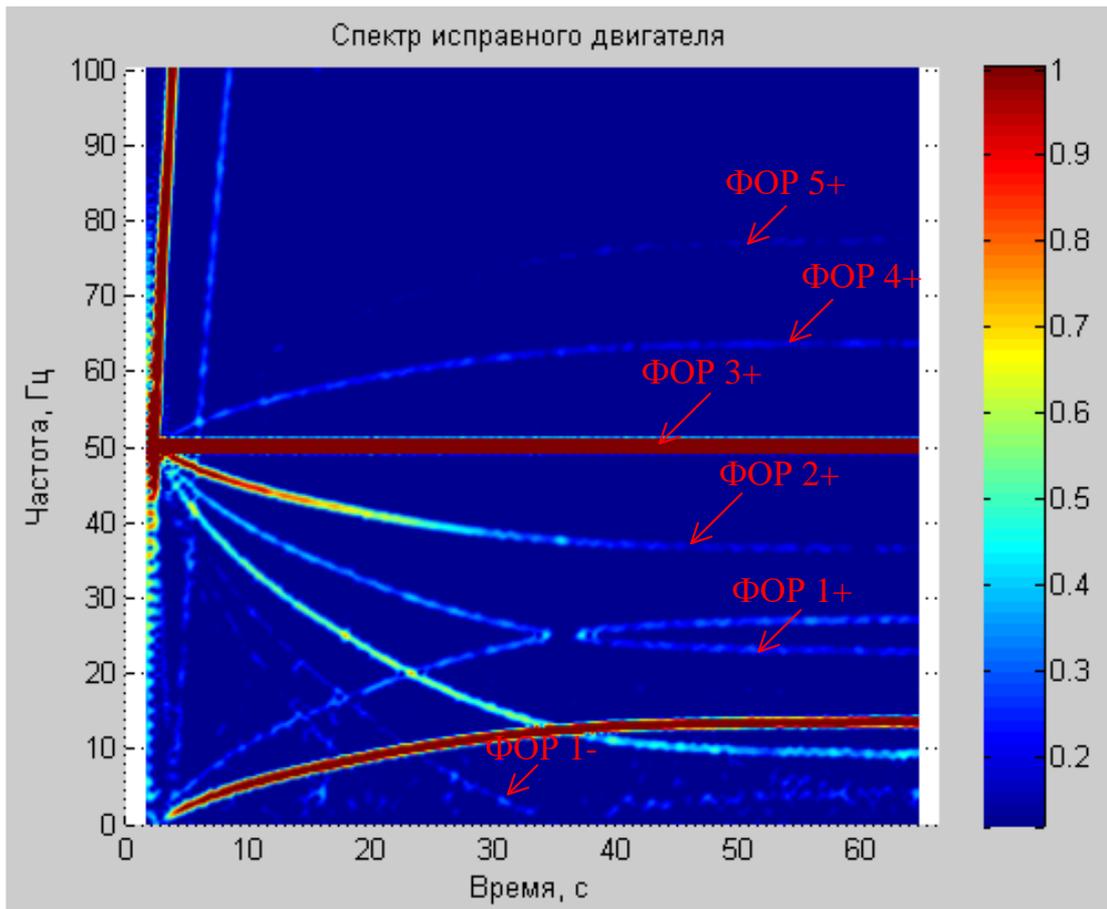


Рис. 4.8. ЧВС радиальной составляющей ВМП АД на экспериментальном стенде с ротором №2 (без оборванных стержней), зарегистрированной с помощью датчика Холла

Полученные спектры при установке на АД исправного и поврежденного ротора представлены на рис. 4.9 и 4.10 соответственно. Из полученных в ходе обработки ЧВС отчетливо видно характерные отраженные гармонические составляющие от ФОР, проявляющиеся при наличии обрыва одного из стержней ОР. Также значительно большие амплитуды имеют и гармоники от ФОР и на верхних боковых частотах. Наличие гармоник от ФОР на верхних боковых частотах в спектре АД без повреждения связано с влиянием ДЭ, так как частоты ФОР 1+ и ФОР 2+ совпадают с частотами ГДЭ 2- и ГДЭ 1- соответственно (как было показано в третьей главе для двигателя с 3 парами полюсов). Остальные гармонические составляющие, проявляющиеся в спектре, не связаны с дефектами ОР. Для наглядности на рис. 4.11 и 4.12 показаны амплитудные спектры сигналов ВМП исправного и поврежденного двигателей в момент времени $t=55$ сек с начала пуска, из которых видно значительное возрастание амплитуд гармоник.

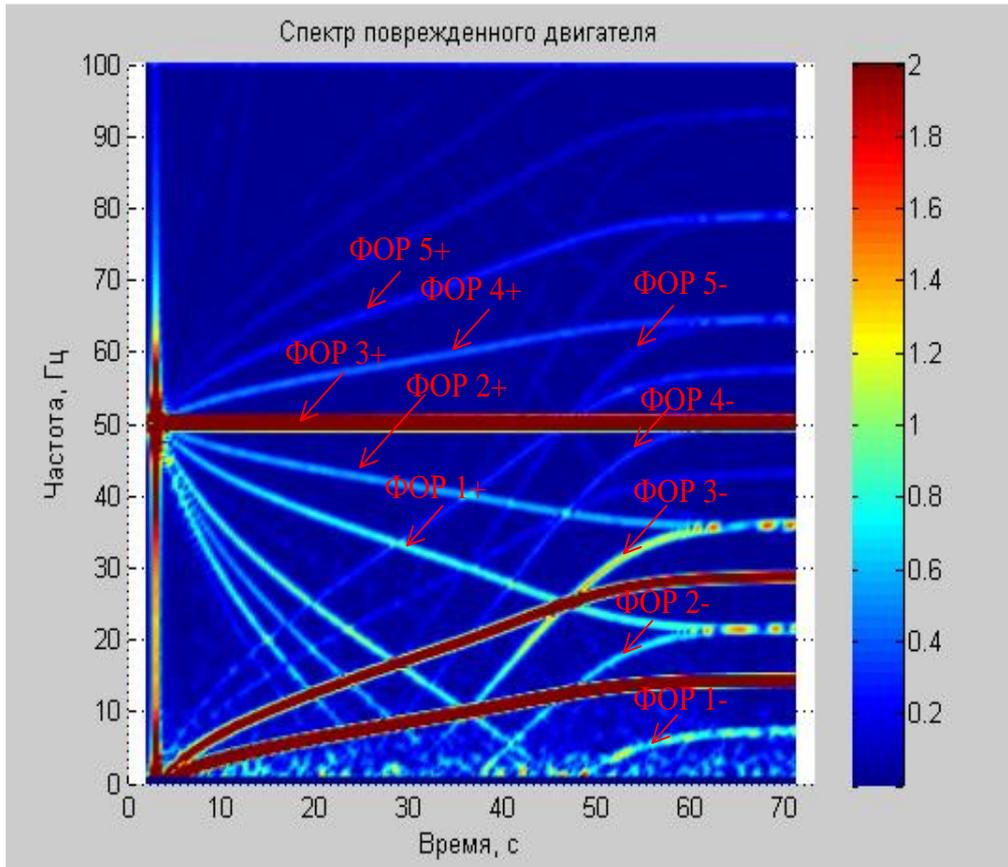


Рис. 4.9. ЧВС радиальной составляющей ВМП АД на экспериментальном стенде с ротором №1 (1 оборванный стержень), зарегистрированной с помощью НИД

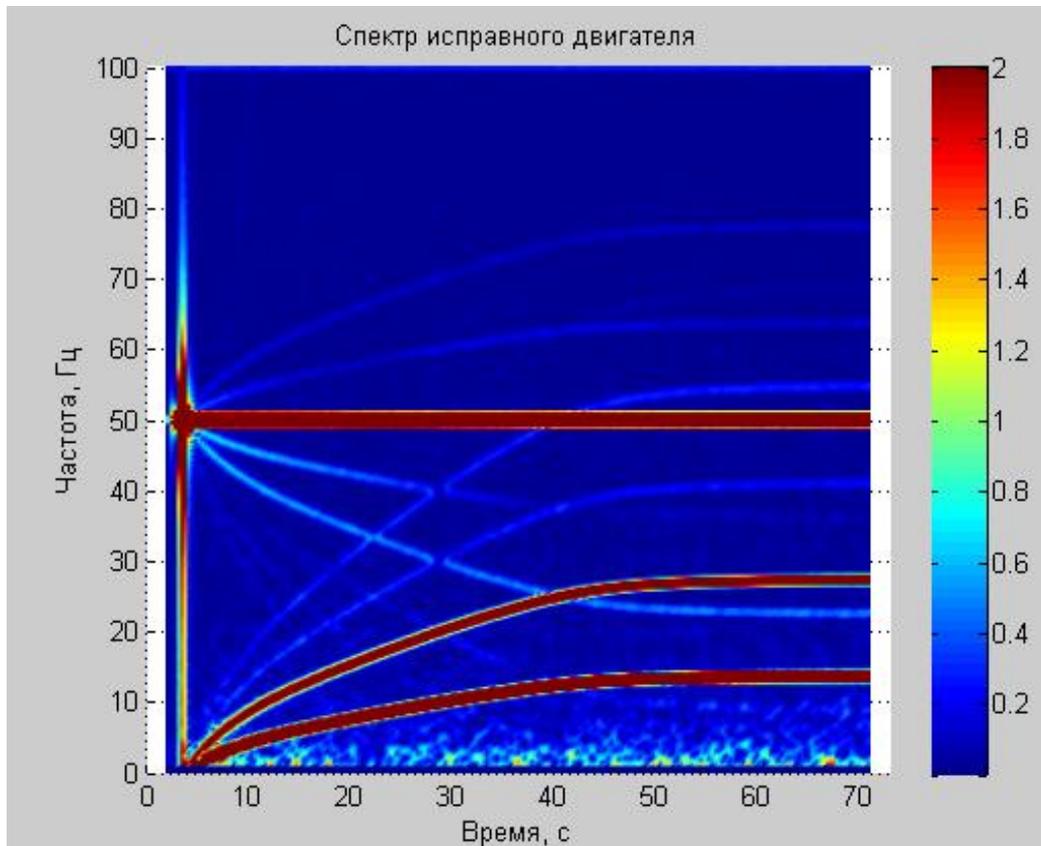


Рис. 4.10. ЧВС радиальной составляющей ВМП АД на экспериментальном стенде с ротором №2 (без оборванных стержней), зарегистрированной с помощью НИД

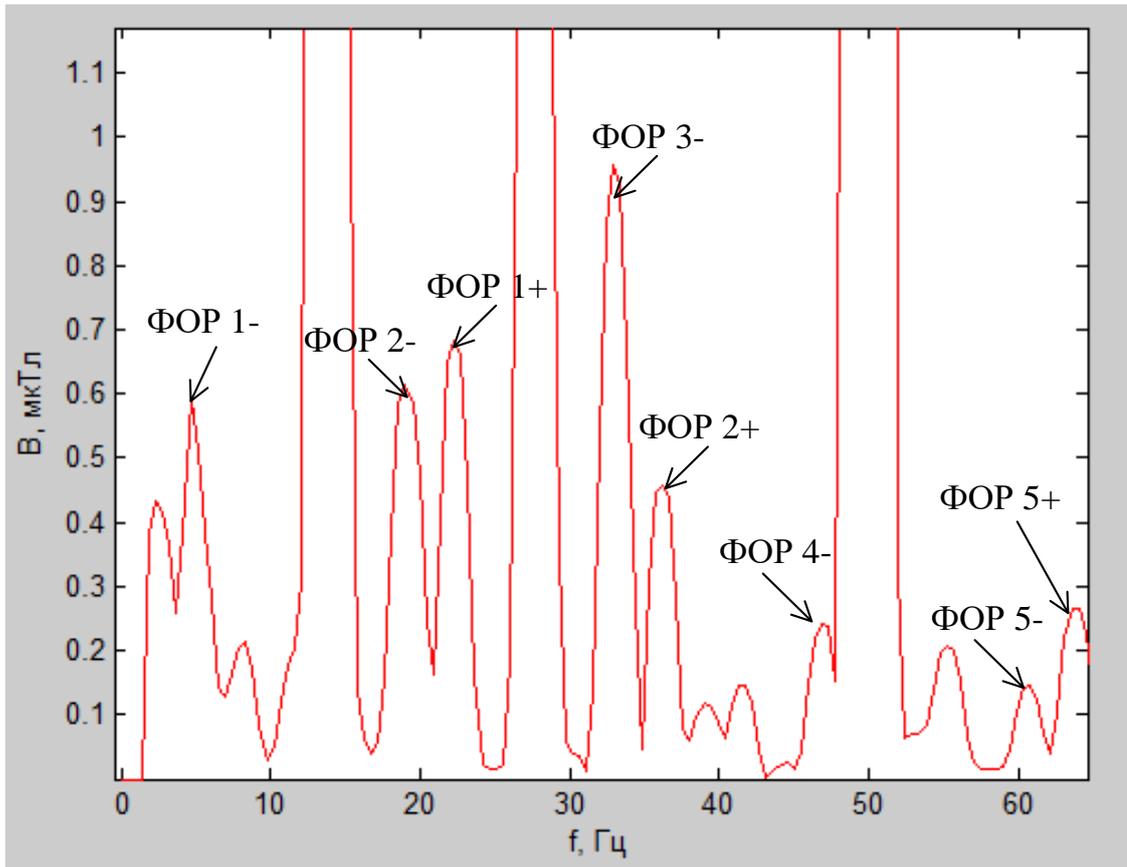


Рис. 4.11. Амплитудный спектр ВМП АД на экспериментальном стенде с ротором №1 (1 оборванный стержень) в момент времени $t=55$ сек, зарегистрированной с помощью НИД

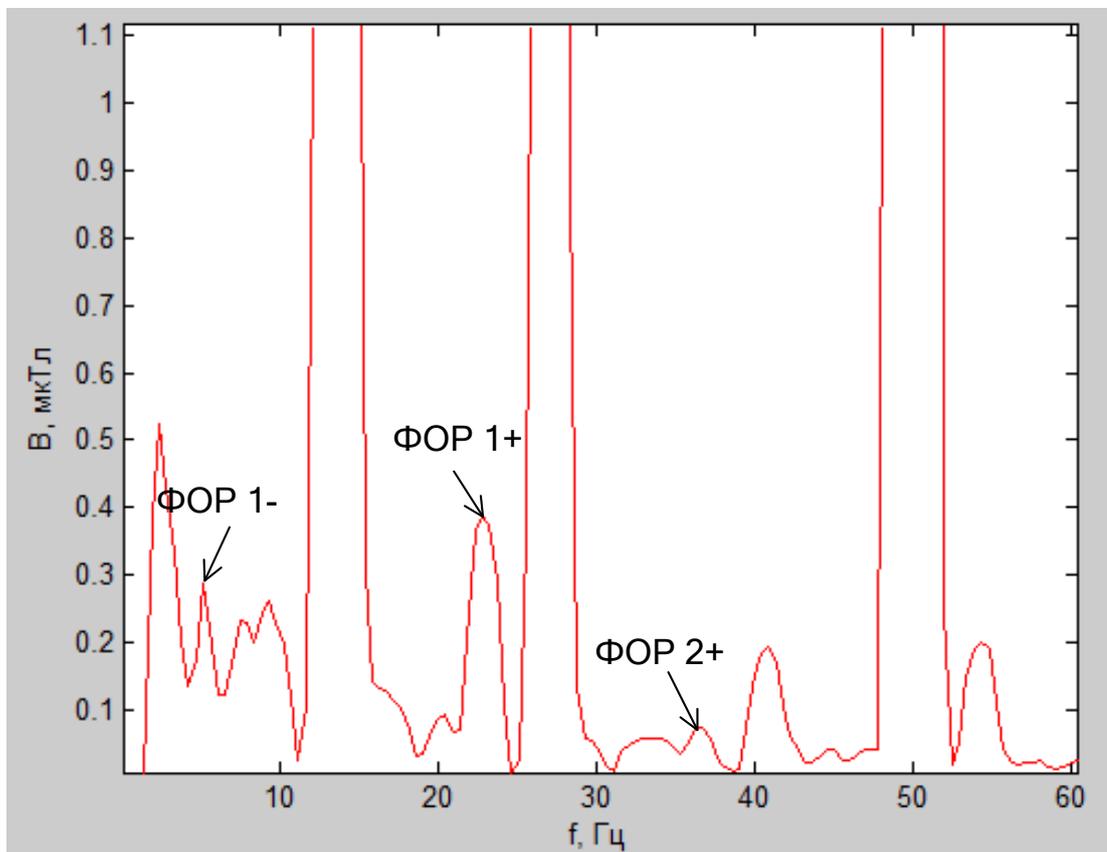


Рис. 4.12. Амплитудный спектр ВМП АД на экспериментальном стенде с ротором №2 (без оборванных стержней) в момент времени $t=55$ сек, зарегистрированной с помощью НИД

Таким образом, в ходе проведенных исследований было подтверждено, что диагностический признак наличия обрыва стержней, а именно, резкий рост амплитуд гармонических составляющих от ФОР в спектре ВМП, может быть использован для контроля технического состояния АД с длительными пусками. Однако следует отметить, как было указано в третьей главе, что при исследованиях на низковольтных АД, в отличие от высоковольтных АД СН, при подаче пониженного напряжения характерным диагностическим признаком будет рост амплитуд только отраженных гармонических составляющих от ФОР низких порядков, так как на амплитуды гармоник от ФОР на верхних боковых частотах оказывает существенное влияние ДЭ.

4.3.3. Анализ влияния обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора на сигнал тока статора реального асинхронного двигателя малой мощности при искусственно затянутом пуске

Далее произведена регистрация и обработка сигнала тока статора на экспериментальном стенде на маломощном низковольтном АД при подаче пониженного напряжения (30 В). Как было отмечено ранее, регистрация осуществлялась с помощью датчика тока, установленного в одной из фаз двигателя.

Спектры АД с ОР с одним оборванным стержнем (ротор №1) и без оборванных стержней (ротор №2) представлены на рис. 4.13 и 4.14 соответственно. Из представленных рисунков видно, что наличие оборванных стержней приводит к резкому возрастанию амплитуды гармоники от ФОР 3- (примерно до 0,01 А) и отчетливому ее проявлению в спектре. В спектре же АД без повреждения ОР эта гармоническая составляющая практически не проявляется. Следует отметить, что в отличие от сигналов ВМП, в спектре тока статора очень слабо проявляются иные гармонические составляющие, которые затрудняют процесс обработки сигнала, что показывает большую эффективность

использования для диагностики именно сигнала тока статора АД (при возможности его регистрации).

Таким образом, исследования на реальном маломощном низковольтном АД также подтвердили наличие диагностического признака и в сигнале тока статора. Поэтому, несмотря на малые амплитуды диагностического сигнала в процессе пуска маломощного АД на пониженном напряжении, результаты экспериментов подтвердили корректность выводов, сделанных при анализе сигналов на математических моделях в третьей главе.

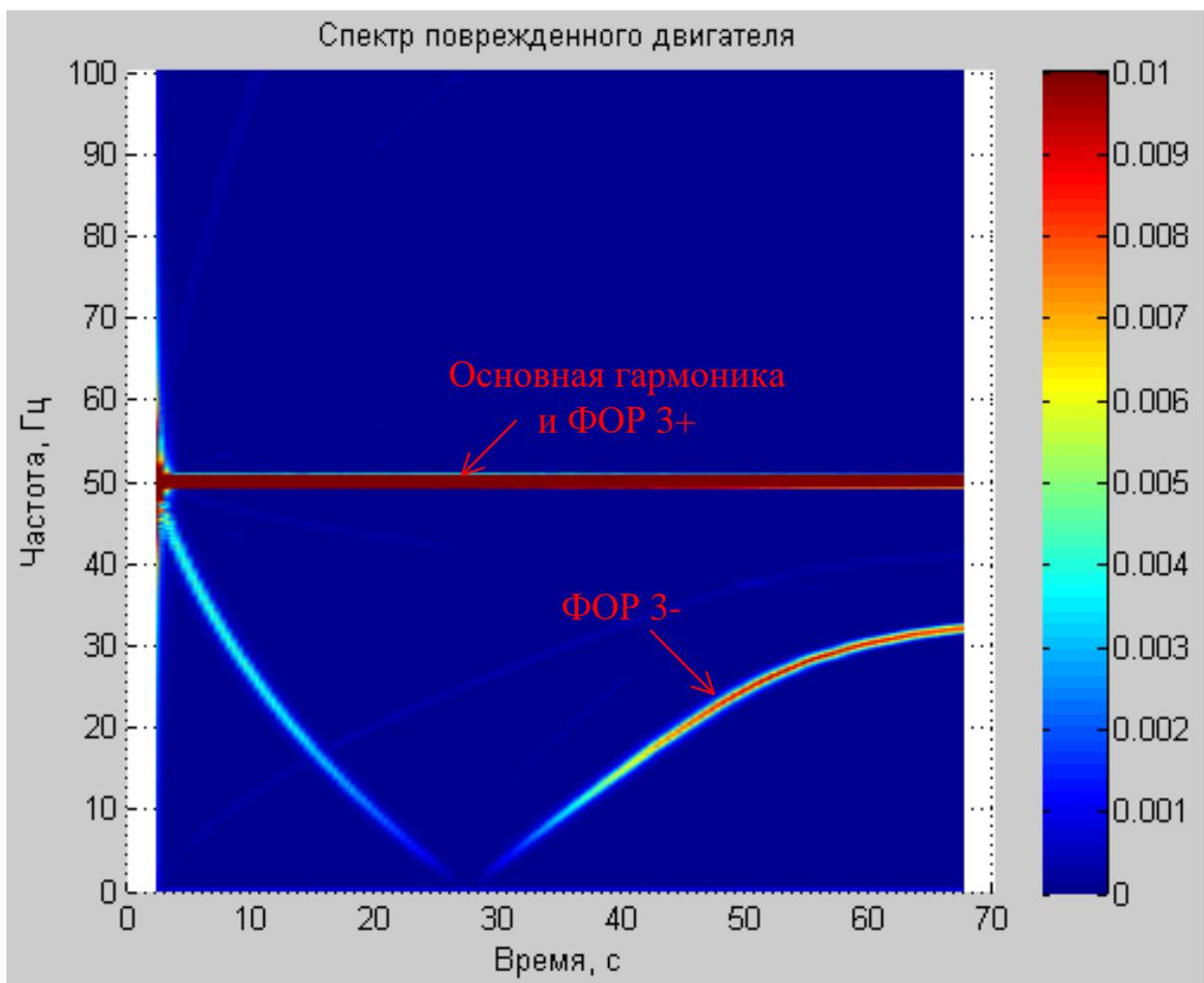


Рис. 4.13. ЧВС тока статора АД на экспериментальном стенде с ротором №1 (1 оборванный стержень)

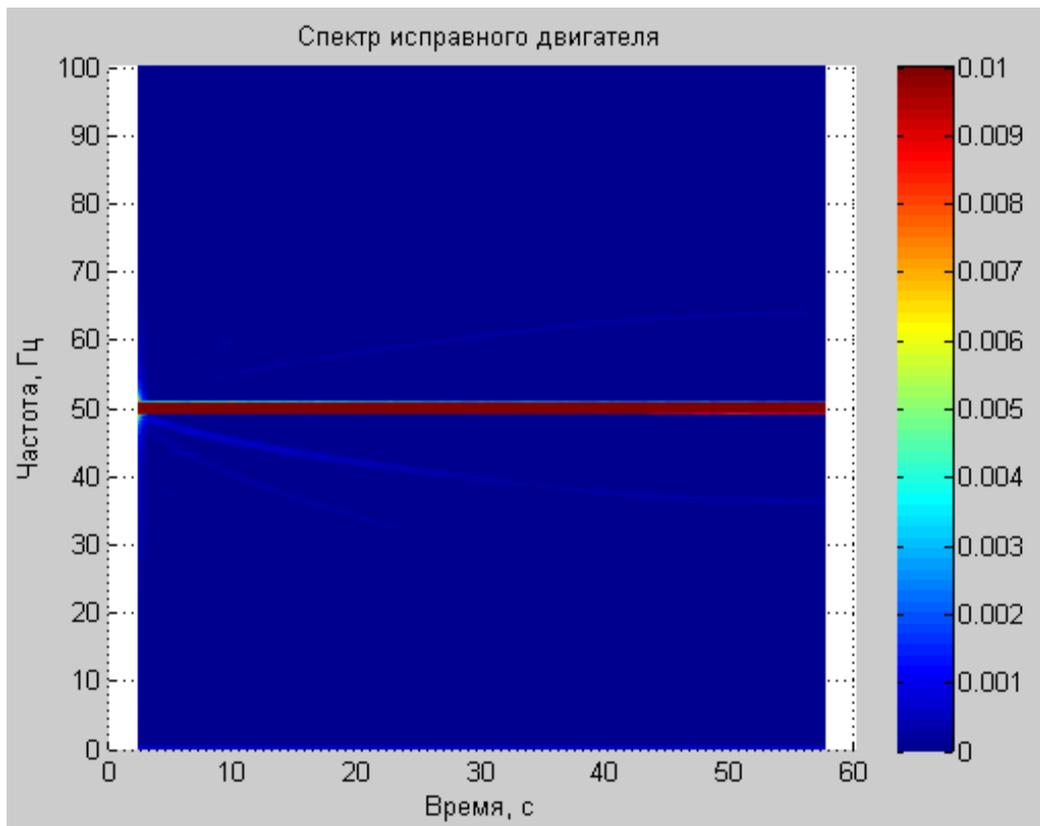


Рис. 4.14. ЧВС тока статора на экспериментальном стенде с ротором №2 (без оборванных стержней)

4.3.4. Сравнение полученных результатов на физической и математической моделях низковольтного маломощного асинхронного двигателя при искусственно затянутом пуске

Поскольку для разработки методики проведения контроля по ВМП или току статора необходимо получение пороговых значений, которые можно оценить на основе построения математических моделей (как показано в главе 1), необходимо сопоставить полученные спектры на физической и математической моделях исследуемого АД при подаче пониженного напряжения.

Расчеты проведены для исследованного ранее на математической модели случая при напряжении 50 В без подключенного механизма, поскольку проведение исследований на математической модели с таким длительным пуском при частоте дискретизации не менее 1000 Гц занимает очень большой промежуток времени. Кроме того, моделирование шкива на математической модели является затруднительным. Первоначально произведена оценка

длительности пуска в рассматриваемом режиме. Было принято решение произвести их сравнение на основе сопоставления внешнего вида ЧВС сигналов на математической модели и на экспериментальном стенде, поскольку непосредственно по сигналам тока статора или ВМП определить длительность их пуска является сложной задачей (что можно видеть, например, на рис. 3.33). В качестве примера на рис. 4.15 представлены спектры ВМП, зарегистрированные с помощью датчика НИД, для АД с ротором без оборванных стержней и с одним оборванным стержнем соответственно, а на рис. 4.16 – спектры тока статора для этих же случаев. Из представленных спектров видно, что и на математической, и на физической модели при подаче такого напряжения пуск двигателя составляет приблизительно 4 секунды.

Далее произведено сравнение амплитуд гармоник от ФОР первых 5 порядков на математической и физической модели АД с исправной обмоткой ротора и поврежденной обмоткой ротора (1 оборванный стержень) для сигналов ВМП и внутреннего магнитного поля, а также сравнение амплитуды гармоники от ФОР 3- и ФОР 3+ для сигнала тока статора. Поскольку пуск АД длится около 4 секунд, для сравнения использованы амплитуды гармоник при скольжении s не более 0,5 (то есть по окончании процесса пуска). Результаты расчета представлены в табл. 4.1-4.3.

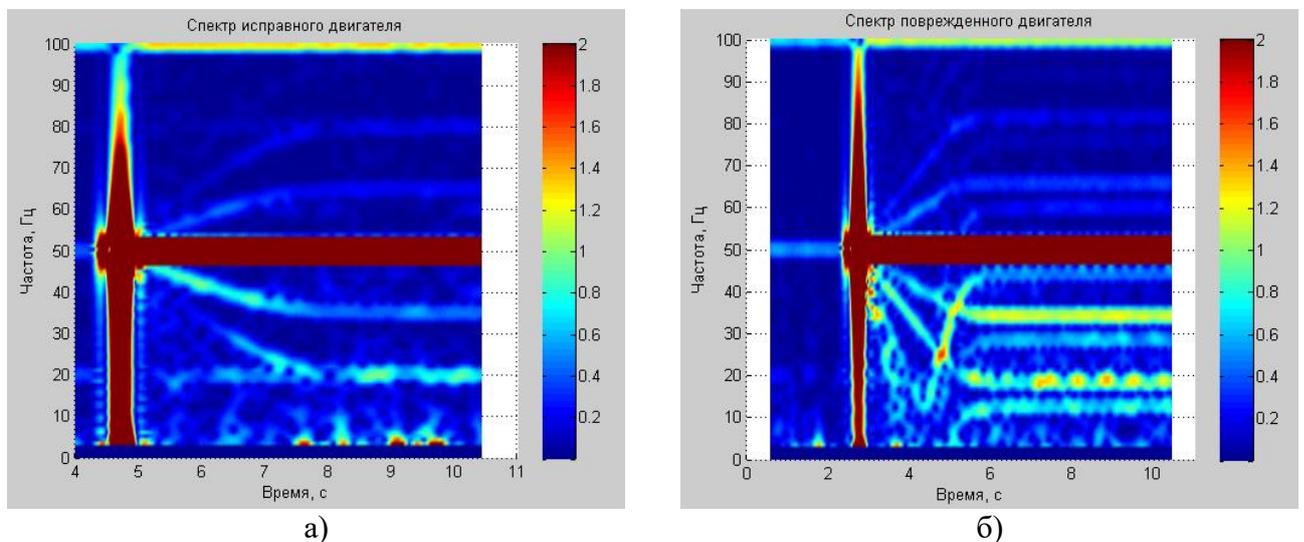


Рис. 4.15. ЧВС ВМП двигателя АИР71А6 на экспериментальном стенде без подключенного механизма при подаче напряжения 50 В: а) с исправной ОР; б) с одним оборванным стержнем ОР

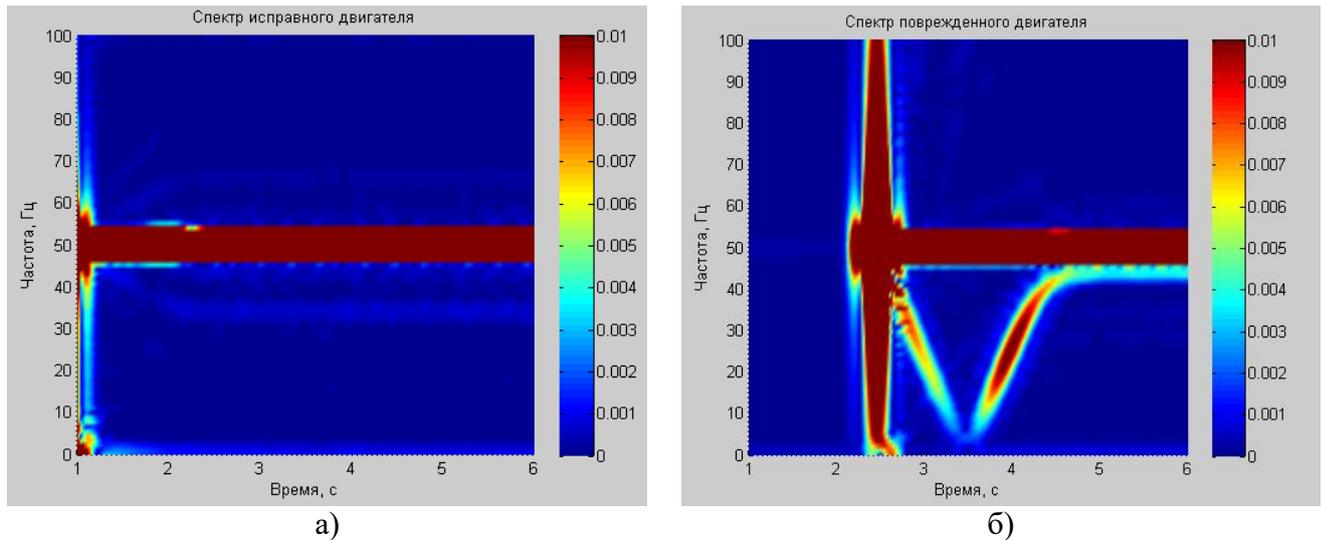


Рис. 4.16. ЧВС тока статора двигателя АИР71А6 на экспериментальном стенде без подключенного механизма при подаче напряжения 50 В: а) с исправной ОР; б) с одним оборванным стержнем ОР

Таблица 4.1. Значения амплитуд гармоник от ФОР 3+ и ФОР 3- для сигнала тока статора двигателя АИР71А6 при подаче напряжения 50 В

Тип двигателя	Амплитуда гармоники от ФОР 3+ (частота 50 Гц)	Амплитуда гармоники от ФОР 3-
Математическая модель АД с исправной ОР	0,3551	0,000056
Экспериментальный стенд, АД с исправной ОР	0,3396	0,000121
Математическая модель АД с оборванным стержнем	0,3575	0,1091
Экспериментальный стенд, АД с оборванным стержнем	0,3884	0,1108

Таблица 4.2. Значения амплитуд гармоник от ФОР для сигнала внутреннего магнитного поля двигателя АИР71А6 при подаче напряжения 50 В (мкТл)

Тип двигателя	ММ АД с исправной ОР	ФМ АД с исправной ОР	ММ АД с оборванным стержнем	ФМ АД с оборванным стержнем
ФОР 1-	1,017	41,25	255,5	341,6
ФОР 2-	1,13	82,28	340,8	336,4
ФОР 3-	Неразличима	68,55	387,9	498,3
ФОР 4-	Неразличима	87,5	438,7	497
ФОР 5-	Неразличима	64,02	488,1	383
ФОР 1+	2,553	118,9	204	357,2
ФОР 2+	3,157	118,1	318	414,6
ФОР 3+	10870	11540	11020	11780
ФОР 4+	3,214	190,8	498,9	300,8
ФОР 5+	3,657	230,1	561,6	380,4

Примечание: под «ММ» понимается математическая модель, а под «ФМ» - физическая модель (АД на экспериментальном стенде)

Таблица 4.3. Значения амплитуд гармоник от ФОР для ВМП АИР71А6 при подаче напряжения 50 В (мкТл)

Тип двигателя	ММ АД с исправной ОР	ФМ АД с исправной ОР	ММ АД с оборванным стержнем	ФМ АД с оборванным стержнем
ФОР 1-	0,00907	0,1095	1,312	1,224
ФОР 2-	0,00687	0,05902	1,221	0,7729
ФОР 3-	0,00662	0,0407	1,2	1,215
ФОР 4-	0,004	Неразличима	0,7602	0,3238
ФОР 5-	0,00361	Неразличима	0,5818	0,2235
ФОР 1+	0,00295	0,5084	0,734	0,8649
ФОР 2+	0,00185	0,08799	0,746	0,5978
ФОР 3+	16,21	21,36	17,48	22,45
ФОР 4+	0,00247	0,1469	0,5449	0,3449
ФОР 5+	0,00165	0,07994	0,4707	0,2931

Примечание: под «ММ» понимается математическая модель, а под «ФМ» - физическая модель (АД на экспериментальном стенде)

Проанализируем полученные результаты. Видно, что для тока статора результаты получились очень близкими друг к другу. Небольшие расхождения могут быть обусловлены неточностью величины приложенного напряжения, а небольшое различие амплитуд при установке исправного ротора – несимметрией ОР АД. Это подтверждает, что математическая модель точно отражает процессы, происходящие в АД, а значение гармоники от ФОР p - при пуске можно использовать в качестве порогового (с соответствующим коэффициентом, описанным в разделе 4.4) для выявления неисправности.

Сравнивая значения амплитуд гармоник от ФОР в сигналах внешнего и внутреннего магнитных полей, можно сделать следующие выводы. Видно, что амплитуды многих гармоник от ФОР при наличии повреждения для внешнего и внутреннего магнитного поля на физической и математической моделях близки, что подтверждает корректность моделей. Различия амплитуд гармоник от ФОР на верхних боковых частотах могут быть обусловлены факторами, не связанными с ОР, например, с ДЭ (как показано в главе 3). Тем не менее, амплитуды ряда отраженных гармоник высоких порядков (4 и 5) также различаются. Поэтому сделан вывод о том, что при проведении контроля использование большого

количества гармонических составляющих нерационально и достаточно производить сравнение амплитуд гармоник от ФОР первых трех порядков.

Также из табл. 4.2 и 4.3 видно, что для исправной ОР амплитуды гармоник от ФОР на математической модели значительно ниже, чем для реального АД. В связи с этим для оценки технического состояния двигателя могут быть использованы только гармоники на математической модели поврежденного АД. Пороговые значения можно оценить как половину значения амплитуд, поскольку на математической и физической моделях они различаются не более чем в 2 раза. В дальнейшем эти значения можно уточнить на основе опыта реальной эксплуатации и анализа тенденции изменения амплитуд на реальных АД.

4.4. Разработка методики проведения контроля технического состояния обрывов стержней обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей электростанций с длительным пуском по току статора и внешнему магнитному полю

На базе проведенных исследований была разработана методика контроля технического состояния ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска механизмов СН электростанций. В основе методики лежит разработанный алгоритм анализа ЧВС пусковых сигналов ВМП и тока статора и их модельный анализ [91]. Блок-схема разработанной методики представлена на рис. 4.17. Она включает в себя следующие этапы:

1) Построение модели АД в программном комплексе Ansys или иных программах с возможностью моделирования обрывов стержней ОР высоковольтных АД СН и производить расчет их электромагнитного поля и тока статора с течением времени.

2) Построение ЧВС ВМП и тока статора при возникновении обрыва одного стержня АД. Построение осуществляется с помощью разработанного алгоритма (описанного в главе 2 и представленного на рис. 2.12). Данная операция

предназначена для получения «эталонного» спектра ВМП при наличии повреждения и определения из нее амплитуд характерных гармонических составляющих.

3) Из спектров определяются амплитуды гармонических составляющих от ФОР в ЧВС сигналов. Для тока статора определяется амплитуда гармоники от ФОР p -, а для ВМП – амплитуды гармоник от ФОР первых трех порядков на верхней и нижней боковых частотах. Поскольку, как было показано в ходе исследований, амплитуды гармоник на математической модели и на реальном АД могут несколько различаться, данный предел берется с коэффициентом запаса, равным 50% (так как и для тока статора, и для ВМП амплитуды гармоник от ФОР при сравнении различались не более, чем в 2 раза). Таким образом, пороговое значение для спектров, построенных на реальном АД, будут определяться как:

$$A_{пор} = 0,5 \cdot A_{ФОР_{ММ}}, \quad (4.1)$$

где $A_{пор}$ – пороговое значение искомой амплитуды гармоники от ФОР;

0,5 – принятый коэффициент запаса;

$A_{ФОР_{ММ}}$ – значение гармоники от ФОР в спектре ВМП или тока статора, полученное на модели АД с одним оборванным стержнем ОР (на эталонном ЧВС).

4) Регистрация сигнала ВМП или тока статора на реальном АД. Сигнал ВМП регистрируется с помощью датчика Холла или аналогичных индуктивных датчиков ВМП, сигнал тока статора регистрируется с одной из фаз АД. Также на этом этапе сигнал оцифровывается и записывается на ПК.

5) Задаются остальные исходные данные, необходимые для построения спектров на реальном АД (частота дискретизации АЦП, время пуска АД, число пар полюсов и т.д.).

6) Построение спектра ВМП или тока статора (в зависимости от регистрируемого сигнала) реального высоковольтного АД СН. Построение также осуществляется с помощью описанного в главе 2 алгоритма.

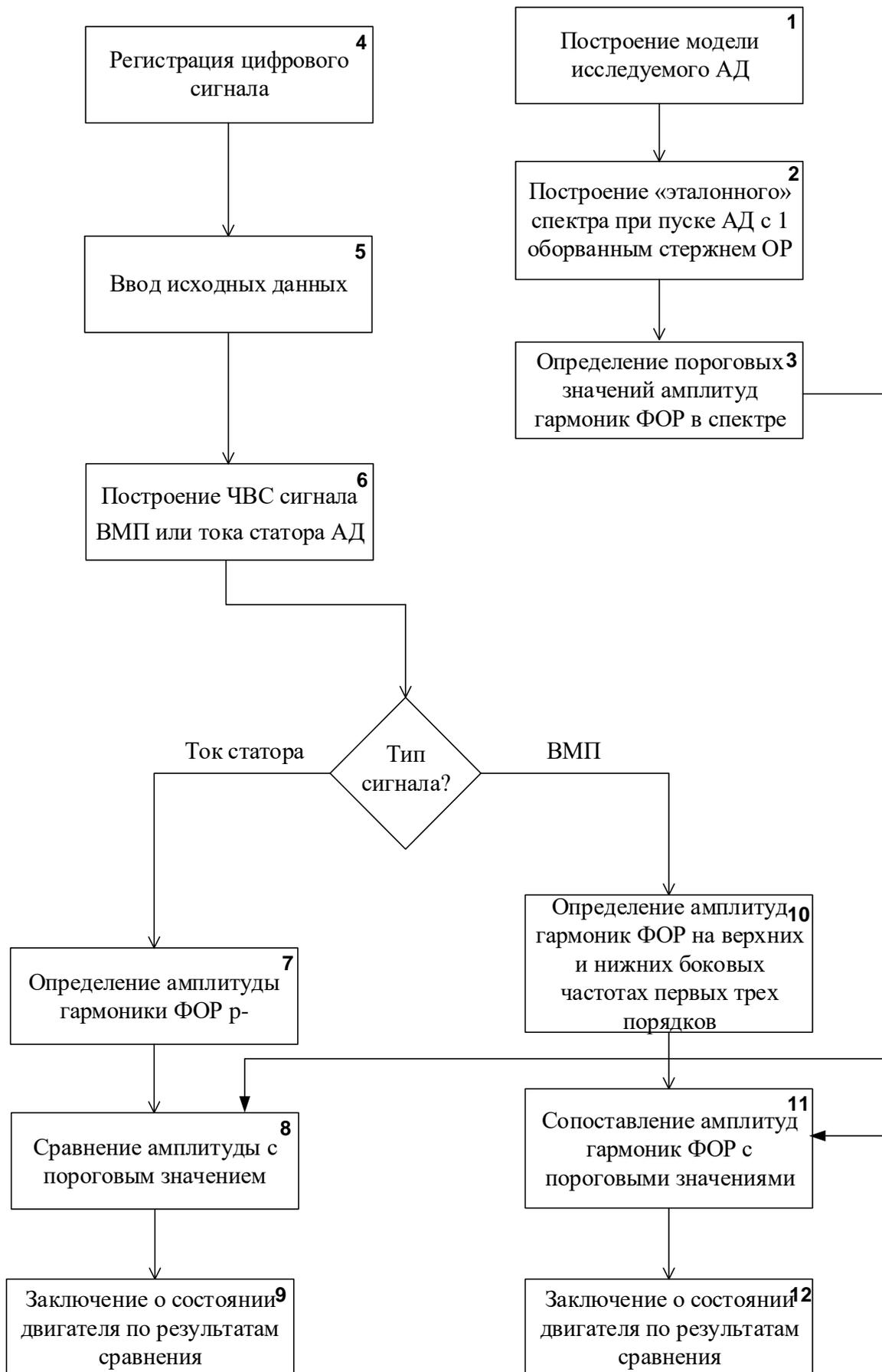


Рис. 4.17. Блок-схема разработанной методики проведения контроля технического состояния ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска СН по току статора и ВМП

7-9) Далее для сигнала тока статора осуществляется оценка в построенном ЧВС амплитуды гармонической составляющей от ФОР р-, так как ее амплитуда является диагностическим параметром наличия неисправности. Полученное значение сравнивается с пороговым значением (блок 3). Если амплитуда гармоники превышает пороговое значение, то у АД имеется обрыв как минимум одного стержня ОР. В противном случае ОР находится в исправном состоянии.

10-12) Для сигнала ВМП на полученном на реальном АД спектре определяются амплитуды гармоник от ФОР первых трех порядков, после чего они сравниваются с пороговыми значениями. Поскольку в качестве диагностических параметров используются амплитуды сразу нескольких гармонических составляющих, то сделать однозначное заключение о техническом состоянии высоковольтного АД по полученным результатам может быть затруднительно. Кроме того, большой сложностью является корректное моделирование высоковольтных АД, в частности, их корпусов. Поэтому, в случае превышения какой-либо из гармоник порогового значения желательна экспертная оценка технического состояния АД на основе анализа всего ЧВС ВМП. Также при проведении экспертной оценки необходимо учитывать тренд, то есть происходит ли рост амплитуды гармонических составляющих от ФОР с течением времени или нет. Резкое возрастание амплитуды гармоник от ФОР однозначно указывает на возникновение обрыва стержня.

4.5. Апробация разработанной методики проведения контроля технического состояния на реальных высоковольтных асинхронных двигателях собственных нужд электростанций

Для оценки эффективности разработанной методики проведения контроля был проведен анализ пусковых сигналов нескольких высоковольтных АД механизмов тягодутьевого тракта на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 города Иваново. Параметры высоковольтных АД, на которых производились экспериментальные

исследования, приведены в таблице 4.4. Для всех этих АД были разработаны математические модели, для АД дымососов и дутьевых вентиляторов они представлены в главе 3.

Таблица 4.4. Параметры исследуемых АД на электростанциях

Наименование механизма СН	Тип двигателя	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, кВт
Дымосос ДС-4А ТЭЦ-2 г. Иваново	ДАМСО-15-12-8	4	740	570
Дымосос ДС-4Б ТЭЦ-2 г. Иваново	ДАМСО-15-12-8	4	740	570
Дымосос ДС-6А ТЭЦ-2 г. Иваново	ДАМСО-15-12-8	4	740	570
Дымосос ДС-6Б ТЭЦ-2 г. Иваново	ДАМСО-15-12-8	4	740	570
Дутьевой вентилятор ДВ-4А ТЭЦ-2 г. Иваново	ДАМСО-14-10-10	5	590	200
Дутьевой вентилятор ДВ-3А ТЭЦ-3 г. Иваново	ДАЗО-17-44-8/10У1	4/5	741/594	630/320
Дутьевой вентилятор ДВ-3Б ТЭЦ-3 г. Иваново	ДАЗО-17-44-8/10У1	4/5	741/594	630/320
Дутьевой вентилятор ДВ-4А ТЭЦ-3 г. Иваново	ДАЗО-17-44-8/10У1	4/5	741/594	630/320

Методика регистрации ВМП на электростанциях аналогична той, которая применялась на низковольтном АД. Регистрация осуществлялась двумя датчиками ВМП: датчиком Холла и датчиком НИД, располагаемыми в зоне середины длины сердечника статора. В качестве примера на рис. 4.18 представлена фотография процесса регистрации радиальной составляющей ВМП на ТЭЦ-3 города Иваново, где отмечены указанные датчики. Аналоговый сигнал

поступает в АЦП, в качестве которого выступает звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2. Оцифрованный сигнал записывается на ноутбук в формате .wav, после чего обрабатывается. Фотография ноутбука и звуковой карты на ТЭЦ-3 представлена на рис. 4.19. Аналогично зарегистрированы сигналы на ТЭЦ-2 города Иваново, пример регистрации сигналов на корпусе одного из электродвигателей с помощью датчика Холла представлен на рис. 4.20.



Рис. 4.18. Процесс регистрации сигнала радиальной составляющей ВМП на корпусе двигателя типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 на ТЭЦ-3 города Иваново (расположение датчиков)

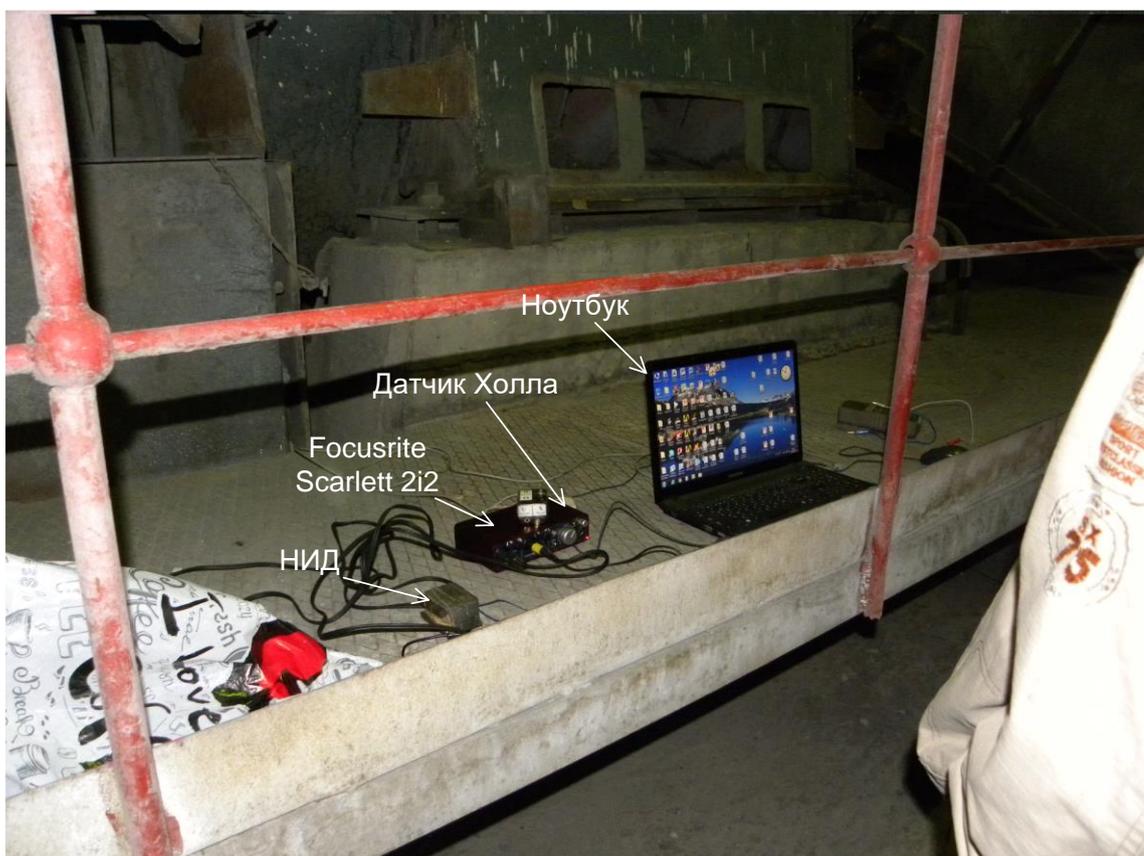


Рис. 4.19. Устройства для регистрации и обработки сигналов ВМП высоковольтных АД СН с длительным пуском



Рис. 4.20. Процесс регистрации сигнала радиальной составляющей ВМП на корпусе двигателя типа ДАМСО-15-12-8 на ТЭЦ-2 города Иваново

Регистрация тока статора осуществлялась с помощью устройства сопряжения с шиной процесса ENMU. Клеммы для измерения тока подключались к измерительным цепям трансформаторов тока. В качестве примера на рис. 4.21 представлена фотография схемы вторичных цепей трансформаторов тока на ТЭЦ-2 города Иваново. Схема соединения измерительных цепей трансформаторов тока – неполная звезда, поэтому для измерения тока в фазах А и С клеммы подключались в цепочки обмоток 2ТТ соответствующих фаз (последовательно с измерительными приборами), а для измерения тока в фазе В – в цепь нулевого провода с обратным подключением выводов, поскольку в нем протекает ток, обратный току в фазе В. После регистрации сигнал поступает в ноутбук через медиаконвертер (для преобразования среды распространения сигнала), где производится его обработка. Формат получаемого сигнала – .csv, который далее может быть преобразован в формат .txt. Также на электростанции производилась регистрация сигналов напряжения, но в данной диссертационной работе их исследование не производится. Схема подключения цепей тока и напряжения прибора представлена на рис. 4.23, процесс регистрации и фотография с подключением прибора в фазы трансформатора тока для измерения тока на одном из АД дымососа представлены на рис. 4.22 и 4.24 соответственно. Аналогичные измерения произведены и на ТЭЦ-3, пример регистрации сигнала на АД дутьевого вентилятора представлен на рис. 4.25. Для получения действительных значений тока статора в цепях АД зарегистрированный сигнал необходимо умножить на коэффициент трансформации измерительных трансформаторов тока.

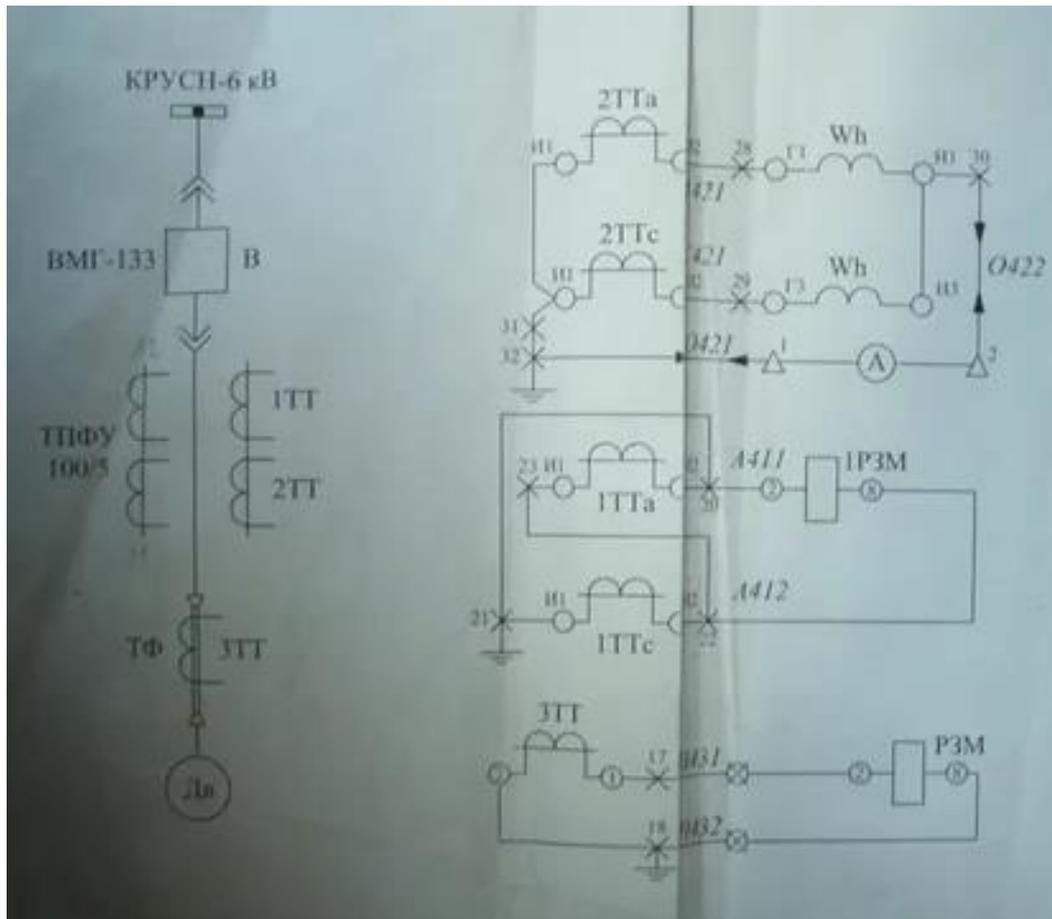


Рис. 4.21. Схема вторичных соединений трансформаторов тока в цепи АД дымососов на ТЭЦ-2 города Иваново

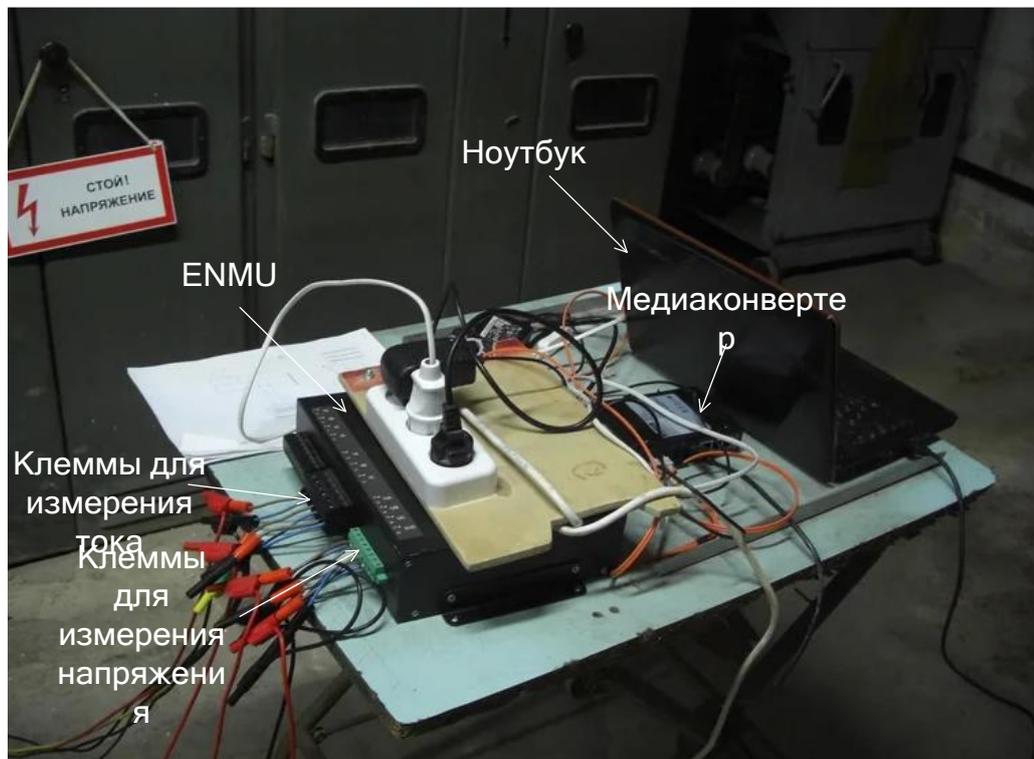
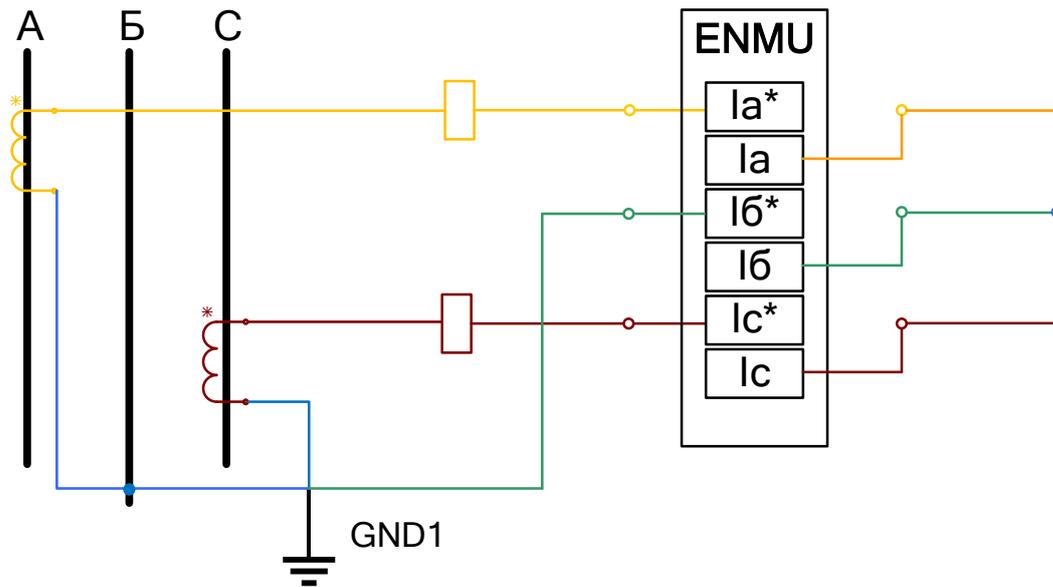


Рис. 4.22. Устройства для регистрации и обработки сигналов тока статора высоковольтных АД СН с длительным пуском

Цепи Тока



Цепи Напряжения

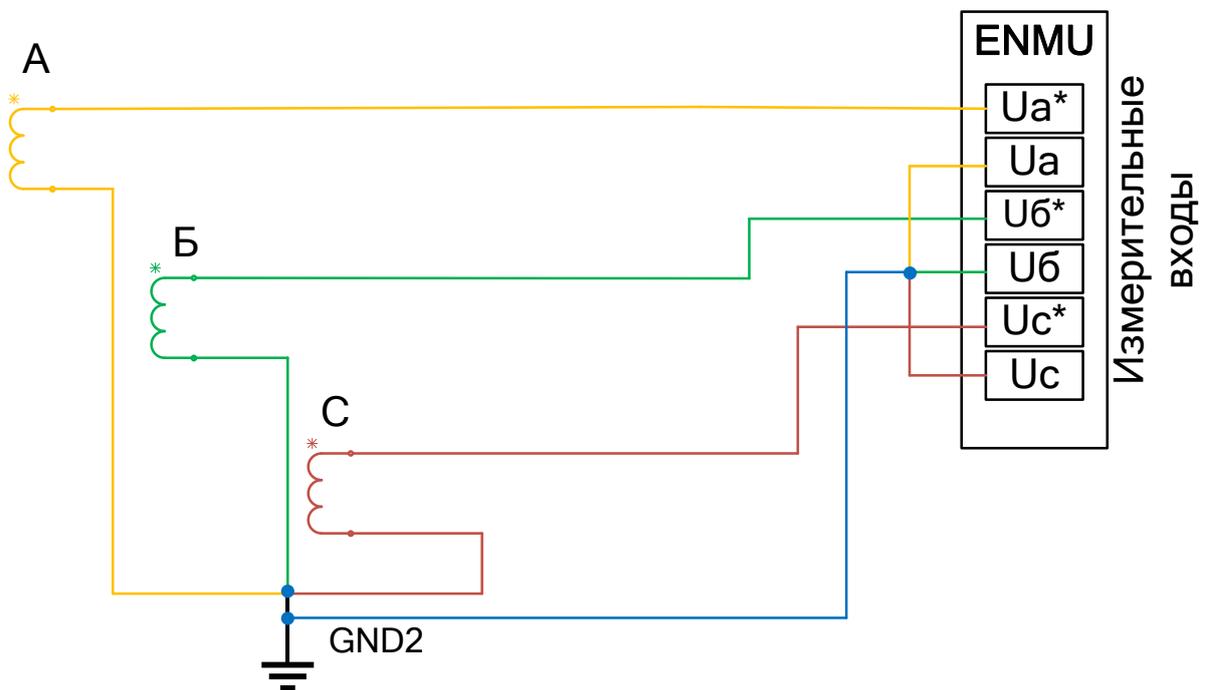


Рис. 4.23. Схема подключения ENMU к измерительным цепям трансформаторов тока и напряжения

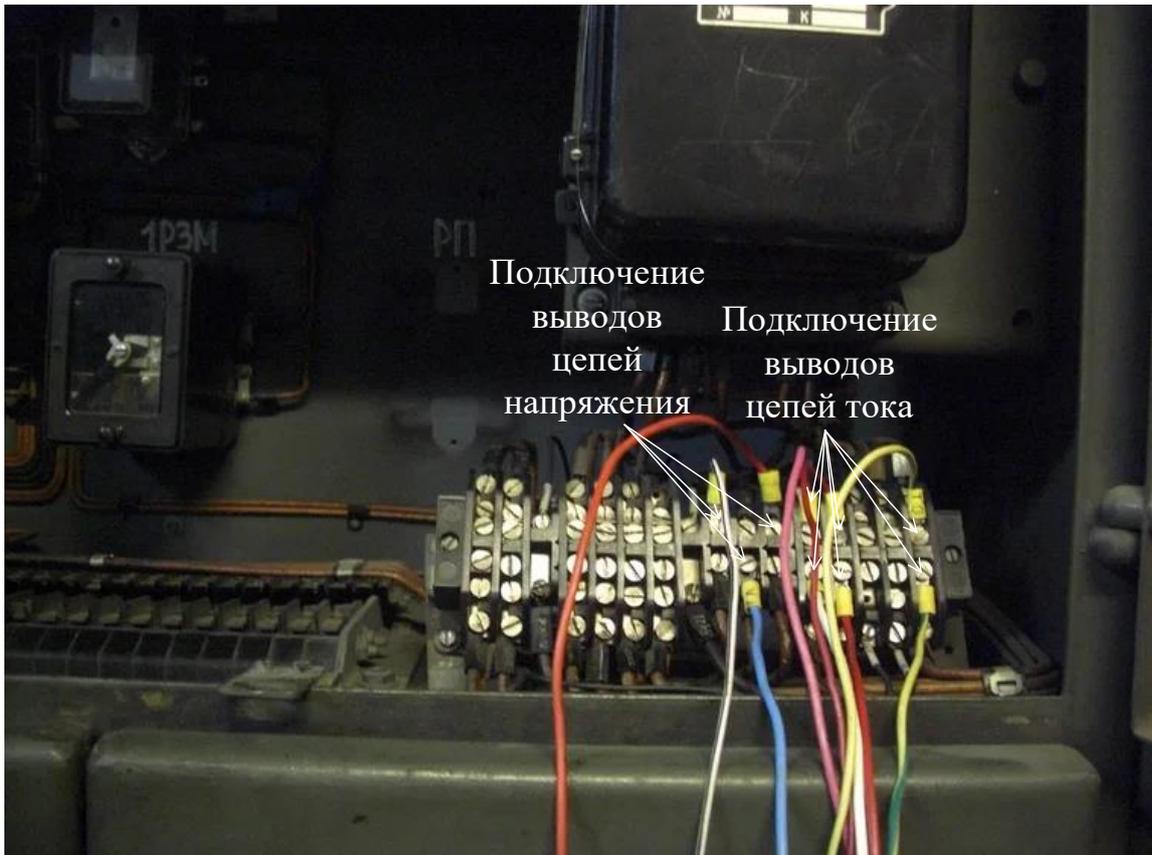


Рис. 4.24. Подключение прибора к измерительным цепям трансформатора тока в цепи АД типа ДАМСО-15-12-8 дымососа на ТЭЦ-2 города Иваново



Рис. 4.25. Процесс регистрации сигнала тока статора АД типа ДАМСО-15-12-8 на ТЭЦ-2 города Иваново

После этого рассмотрим разработанную методику проведения контроля на примере АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1.

Проведение контроля по току статора:

1-3) Первоначально разработана модель двигателя в программном комплексе Ansys. Разработанная модель АД представлена ранее в главе 3 (рис. 3.3). На модели АД с одним оборванным стержнем ОР был построен спектр тока статора и определена амплитуда гармоники от ФОР 5- (так как пуск осуществляется на более низкой скорости). Значение определялось в первой половине пускового режима, так как в этом случае амплитуда гармоники выше (показано в главе 3).

Для рассматриваемого АД значение амплитуды составило приблизительно 1,1 А. ЧВС на математической модели, который можно считать эталонным, представлен на рис. 4.26 для сравнения со спектрами реальных АД на электростанции. По выражению (4.1) определяем пороговое значение амплитуды гармоники от ФОР 5-, которое для данного АД составляет 0,55 А.

4-5) Осуществлена регистрация сигналов тока статора на двух однотипных высоковольтных АД при пуске (1 – двигатель дутьевого вентилятора ДВ-3А, 2 – двигатель дутьевого вентилятора ДВ-3Б) во всех трех фазах АД. Методика регистрации сигнала тока статора описана ранее в этом разделе. Коэффициент трансформации трансформаторов тока на ТЭЦ-3 города Иваново в цепи дутьевых вентиляторов составляет 60 (300 А / 5 А). Частота дискретизации составляла 12800 Гц, время пуска АД составляло около 15 секунд. Для обработки применялось окно Флэттоп с $\Delta F = 5$.

б) С помощью разработанного алгоритма в программном комплексе Matlab были построены ЧВС тока статора зарегистрированных оцифрованных сигналов на указанных АД. Оценка времени пуска показала, что такой длительности пуска достаточно для корректного построения спектра при заданных условиях, длительность интервалов разбиения принята равной 2 секундам (входит в интервал, определяемый по выражению (2.27)). Полученные ЧВС на примере спектров одной из фаз АД представлены на рис. 4.27 и 4.28 для исследуемых

двигателей. На других фазах спектры практически не изменяются. Видно, что во втором из спектров можно отчетливо видеть гармонику от ФОР 5-, однако ее амплитуда имеет малую величину. В первом спектре эта гармоника практически неразличима.

7-9) Далее оценивались значения амплитуд гармоник от ФОР 5- на полученных ЧВС сигнала тока статора высоковольтных АД. В результате на АД дутьевого вентилятора ДВ-3А амплитуда искомой гармоники составила 0,024 А, а для АД дутьевого вентилятора ДВ-3Б – 0,067 А. Оба этих значения приблизительно на порядок меньше порогового значения, которое было определено в ходе первых операций и составляет 0,55 А. Поэтому можно сделать заключение о том, что ОР обоих рассматриваемых АД находятся в исправном состоянии и не имеют оборванных стержней.

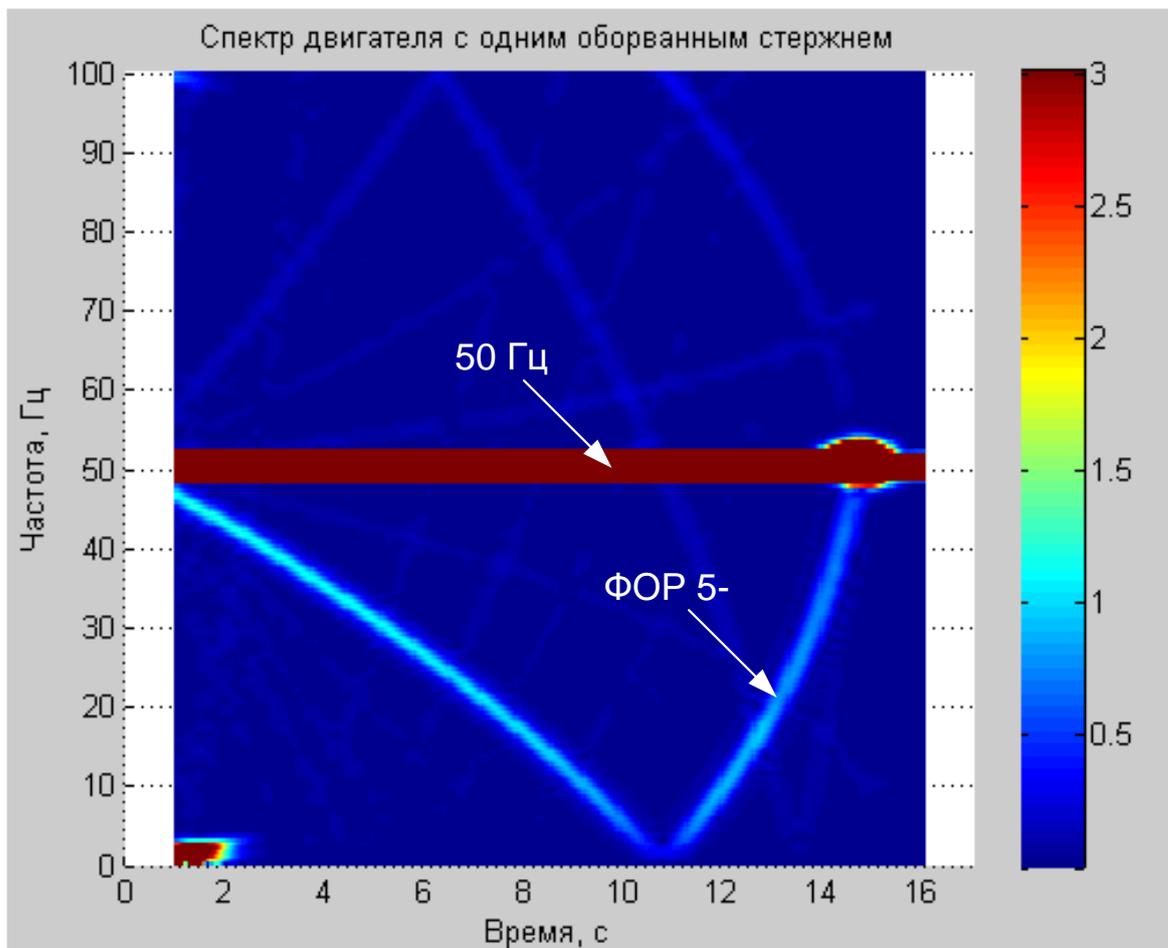


Рис. 4.26. Эталонный ЧВС тока статора высоковольтного АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1

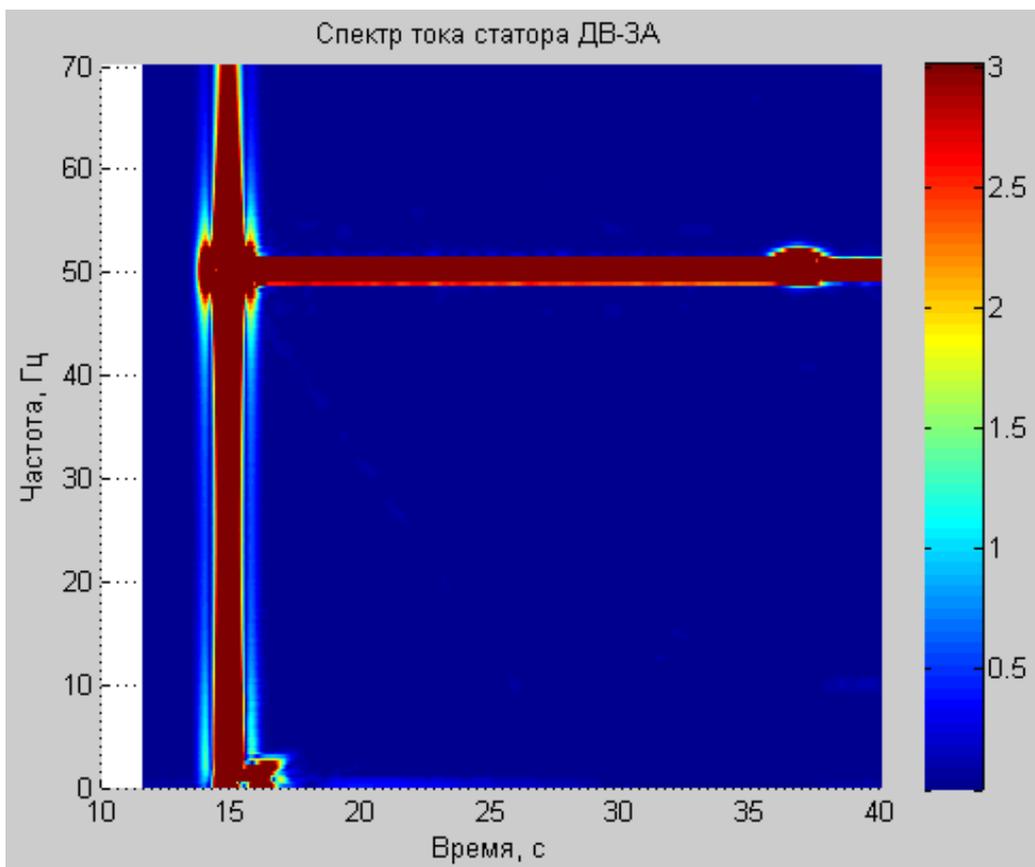


Рис. 4.27. ЧВС тока статора при пуске высоковольтного АД дутьевого вентилятора ДВ-3А на ТЭЦ-3 города Иваново

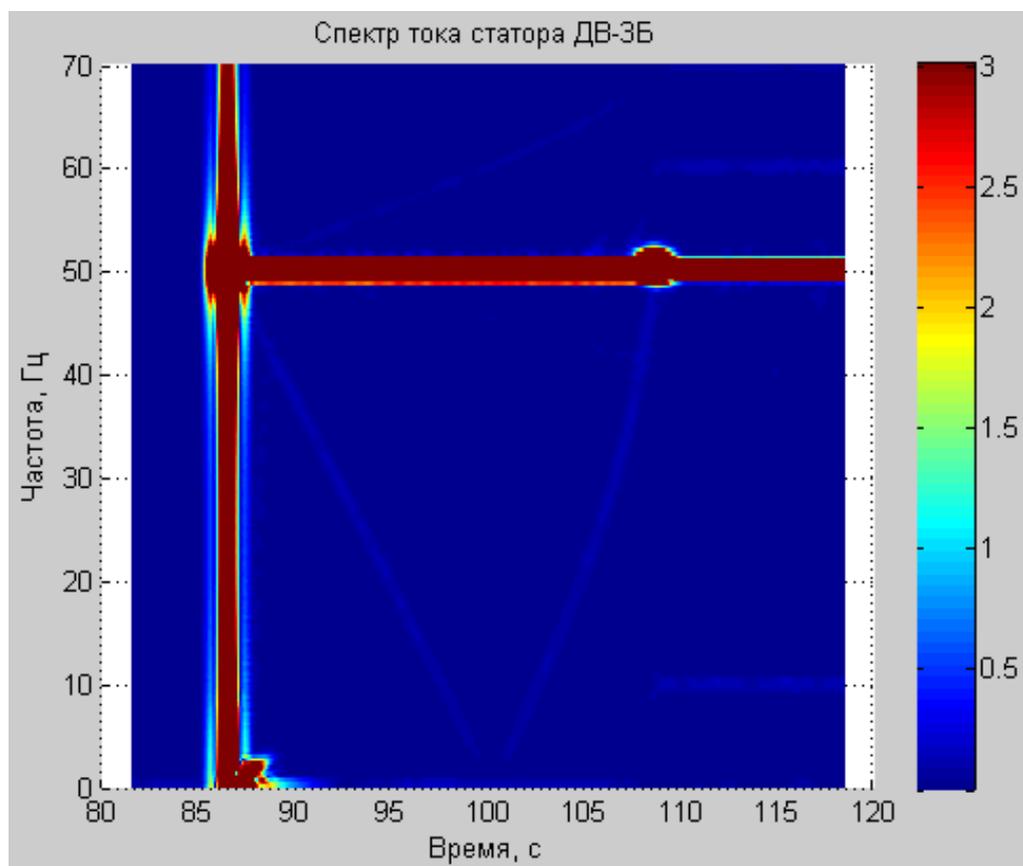


Рис. 4.28. ЧВС тока статора при пуске высоковольтного АД дутьевого вентилятора ДВ-3Б на ТЭЦ-3 города Иваново

Проведение контроля по ВМП:

1-3) пункты 1-3 выполняются аналогично тому, что было выполнено для сигналов тока статора. В результате расчета получены следующие значения амплитуд гармоник от ФОР первых трех порядков: ФОР 1- – 0,06533 мкТл; ФОР 2- – 0,1234 мкТл; ФОР 3- – 0,1287 мкТл; ФОР 1+ – 0,0814 мкТл; ФОР 2+ – 0,0613 мкТл; ФОР 3+ – 0,0363 мкТл. Пороговые значения, определяемые по выражению (4.1), составляют: ФОР 1- – 0,03267 мкТл; ФОР 2- – 0,0617 мкТл; ФОР 3- – 0,0644 мкТл; ФОР 1+ – 0,0407 мкТл; ФОР 2+ – 0,0307 мкТл; ФОР 3+ – 0,0182 мкТл.

4-6) Осуществлена регистрация сигнала ВМП на высоковольтном АД дутьевого вентилятора ДВ-4А при пуске. Процесс регистрации ВМП на корпусе АД представлен на рис. 4.18. Осуществлялась обработка сигнала, зарегистрированного с помощью датчика НИД, так как корпус АД выполнен из магнитного материала, поэтому датчик Холла не обладает достаточной чувствительностью и гармоники от ФОР получаются неразличимыми на фоне шумов. В качестве АЦП также выступала звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2. В качестве исходных параметров использованы: частота дискретизации – 22050 Гц, время пуска АД – 15 секунд, для обработки использовано окно Флэттоп с $\Delta F = 5$, число пар полюсов АД – 5. Далее построен ЧВС сигнала, представленный на рис. 4.29, в котором можно увидеть гармоники от ФОР первых трех порядков.

10-12) В результате обработки спектров полученного сигнала, были определены амплитуды гармонических составляющих от ФОР. Для наглядности значения амплитуд на реальном АД и его математической модели с одним оборванным стержнем, а также пороговые значения представлены в табл. 4.5, а эталонный спектр – на рис. 4.30. Из результатов видно, что, хотя в спектре могут быть выявлены указанные гармоники, ни одна из них не превышает граничные значения, что позволяет сделать заключение об исправном состоянии АД.

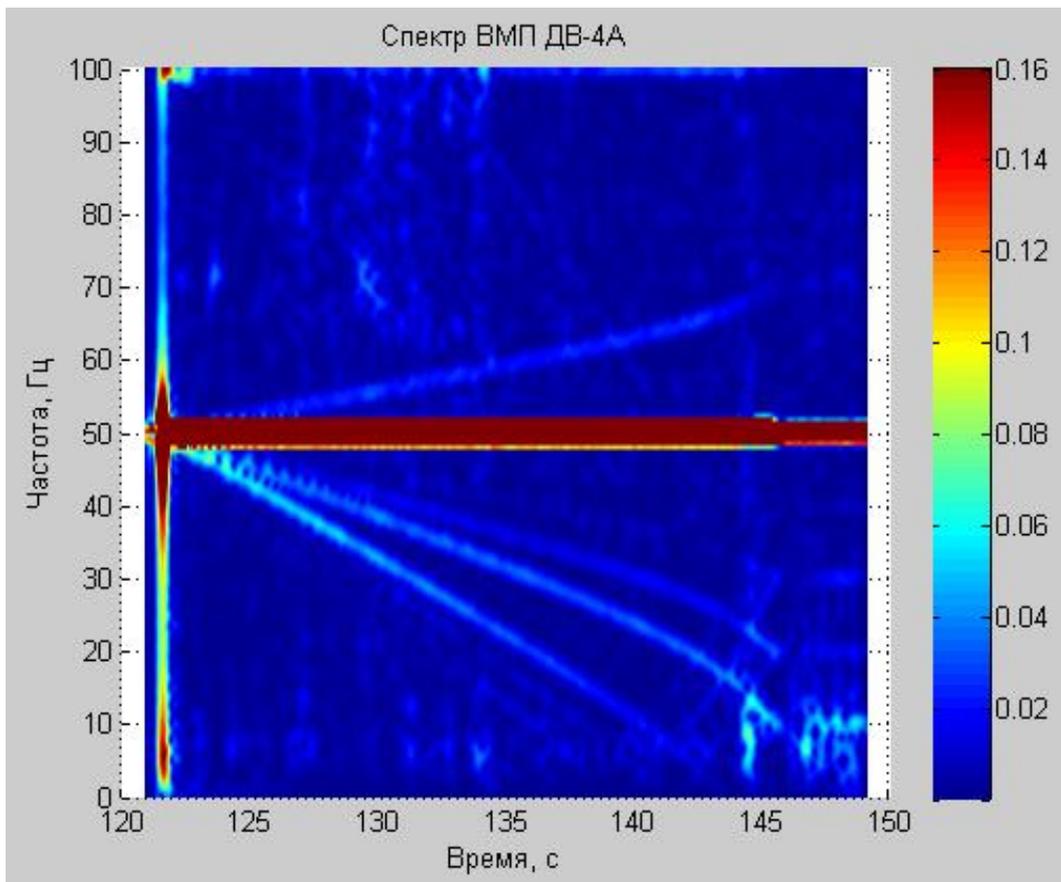


Рис. 4.29. ЧВС ВМП при пуске высоковольтного АД дутьевого вентилятора ДВ-4А на ТЭЦ-3

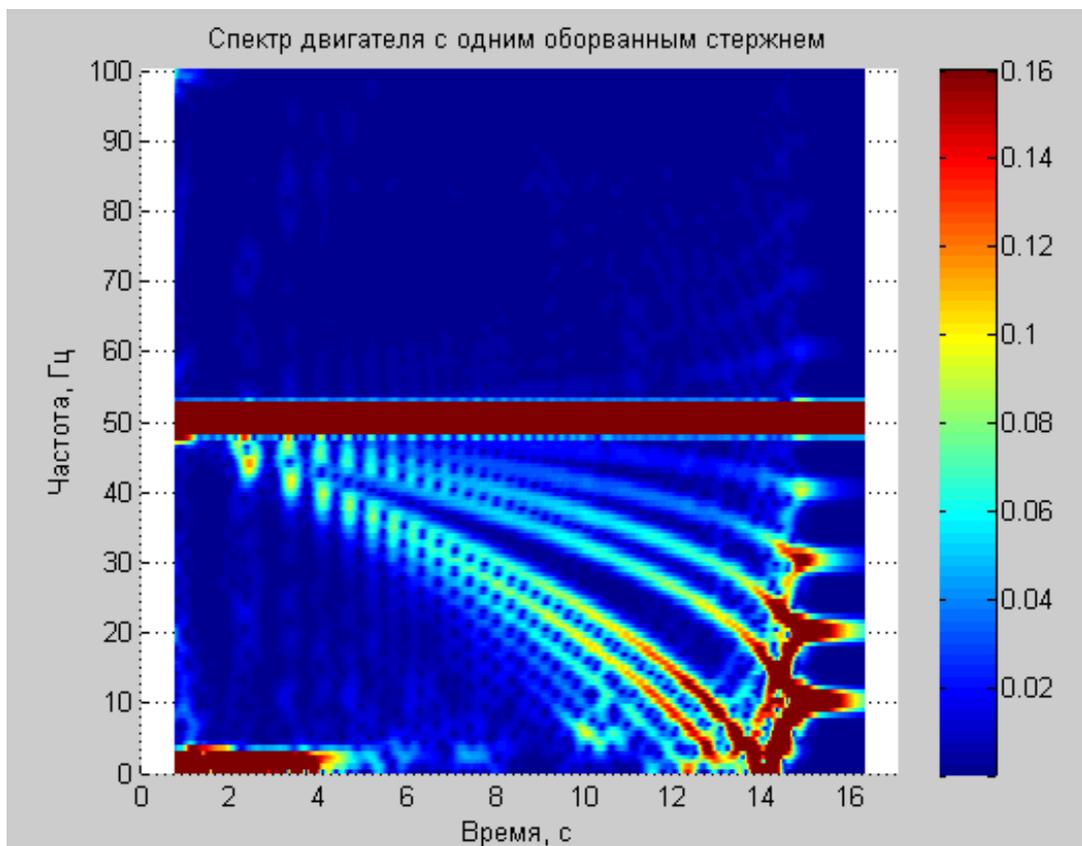


Рис. 4.30. Эталонный ЧВС для АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1

Таблица 4.5. Значения амплитуд гармоник от ФОР для ВМП на исследуемом АД типа ДАЗО-17-44-8/10У1 и его математической модели с одним оборванным стержнем (мкТл)

Наименование гармоники	Реальный АД дутьевого вентилятора ДВ-4А	Математическая модель с одним оборванным стержнем	Пороговые значения
ФОР 1-	0,0221	0,06533	0,03267
ФОР 2-	0,0102	0,1234	0,0617
ФОР 3-	0,0133	0,1287	0,0644
ФОР 1+	0,0296	0,0814	0,0407
ФОР 2+	0,0185	0,0613	0,0307
ФОР 3+	0,0072	0,0363	0,0182

Аналогичным образом произведены испытания на нескольких АД типа ДАМСО-15-12-8 на ТЭЦ-2 города Иваново. Коэффициент трансформации измерительных трансформаторов тока составляет 20 (100/5). Частота дискретизации также составляла 12800 Гц. Спектры тока статора в пусковом режиме для АД дымососов ДС-6А и ДС-6Б представлены на рис. 4.31 и 4.32, а эталонный спектр этого типа АД – на рис. 4.33. Амплитуды гармоники от ФОР 4- для этих двигателей составили 0,615 и 0,175 соответственно. Пороговое значение, полученное по выражению (4.1), составило 0,88 А. В результате можно сделать вывод, что на обоих АД ОР в исправном состоянии.

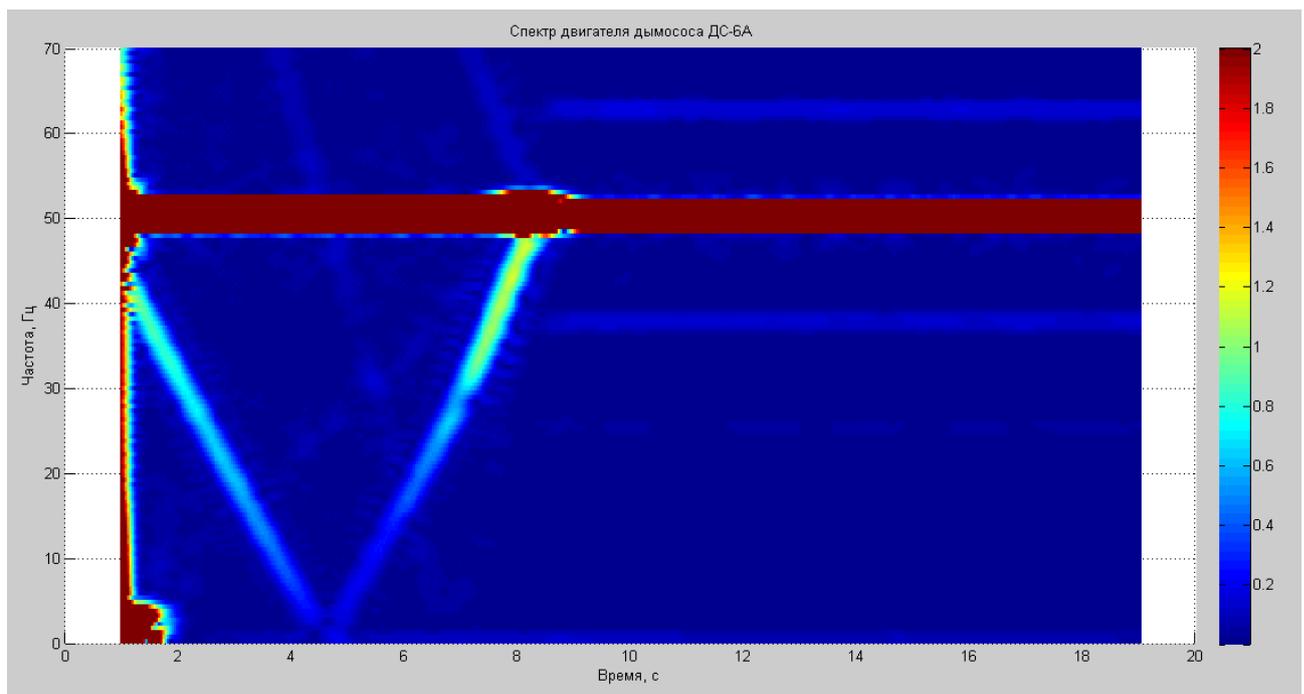


Рис. 4.31. ЧВС тока статора при пуске высоковольтного АД дымососа ДС-6А на ТЭЦ-2

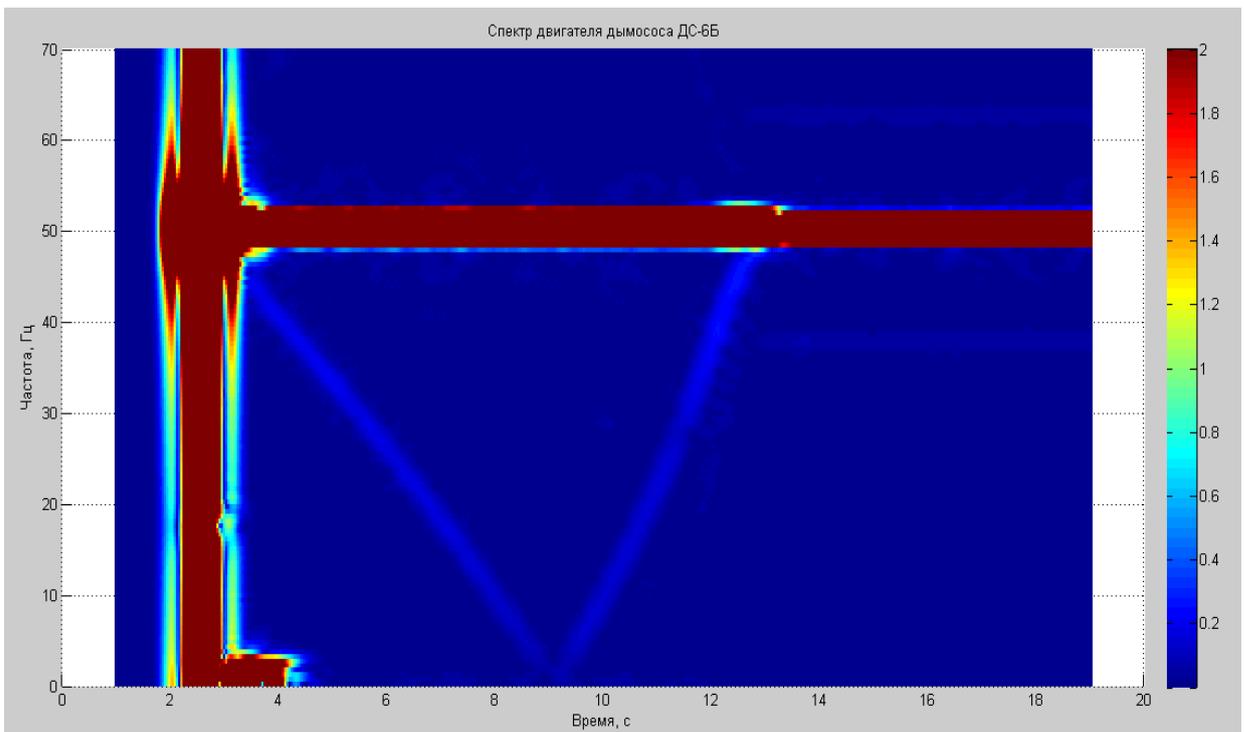


Рис. 4.32. ЧВС тока статора при пуске высоковольтного АД дымососа ДС-6Б на ТЭЦ-2

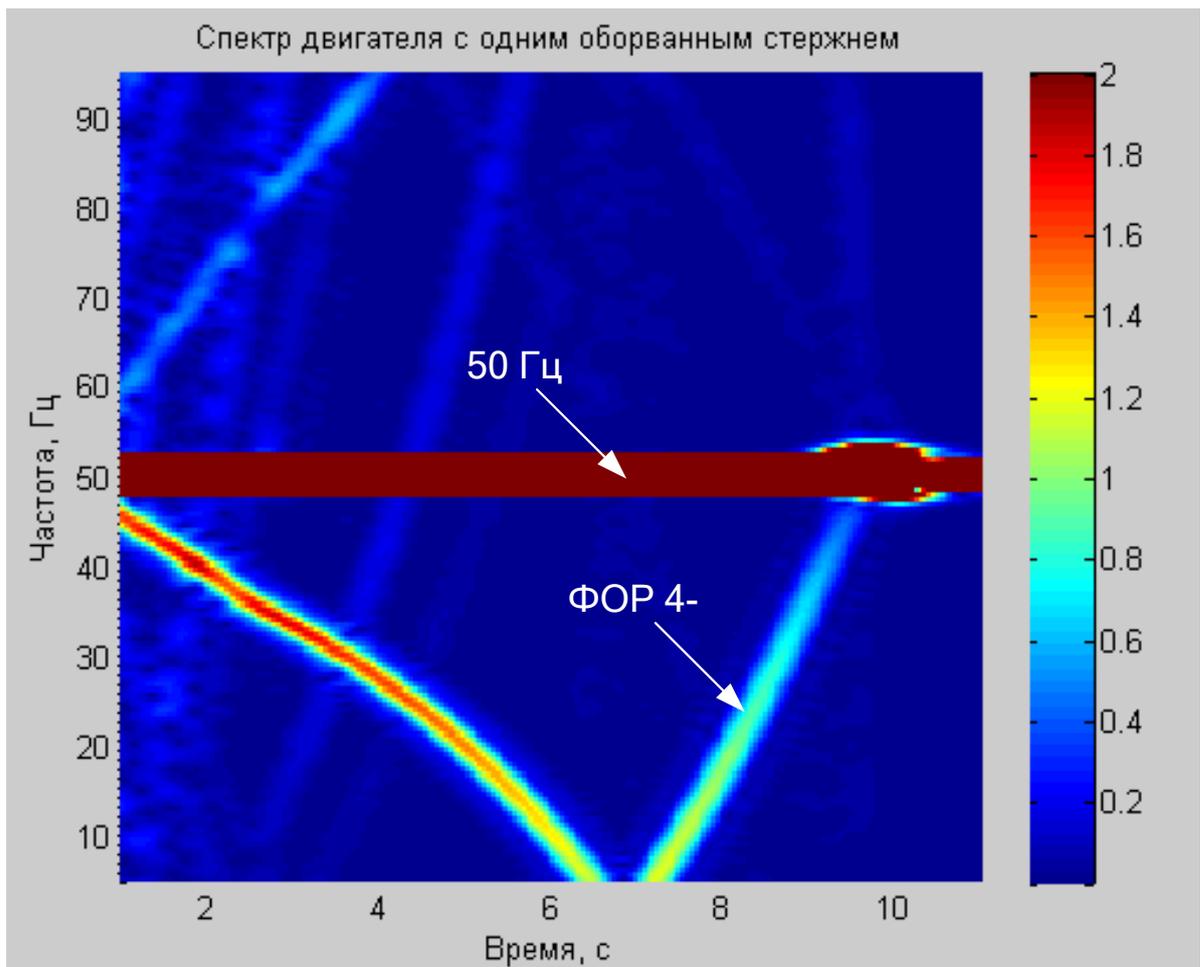


Рис. 4.33. Эталонный ЧВС тока статора высоковольтного АД типа ДАМСО-15-12-8

Спектры ВМП для нескольких АД т же типа представлены на рис. 4.34-4.37, а эталонный спектр – на рис. 4.38. Сигналы на ТЭЦ-2, по которым произведен контроль технического состояния ОР рассматриваемых АД, были также зарегистрированы с помощью НИД. Значения амплитуд и пороговые значения сведены в таблице 4.6. По результатам видно, что все АД находятся в исправном состоянии, поскольку значения амплитуд гармонических составляющих от ФОР первых трех порядков не превышают пороговых значений.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается двумя актами внедрения, представленными в приложении 3. Также получены патенты на изобретение на разработанные способы контроля технического состояния ОР высоковольтных АД с длительными пусками по току статора [136] и ВМП [135], что также показано в приложении 4.

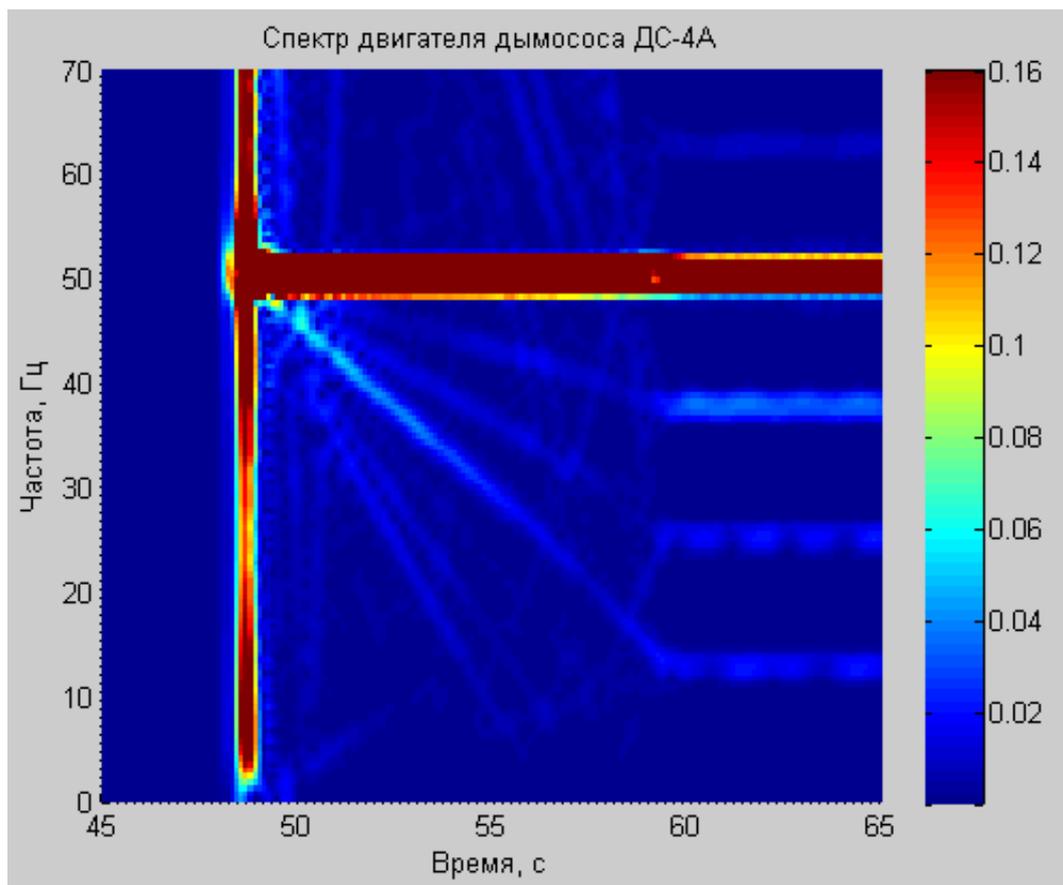


Рис. 4.34. ЧВС ВМП при пуске высоковольтного АД дымососа ДС-4А на ТЭЦ-2

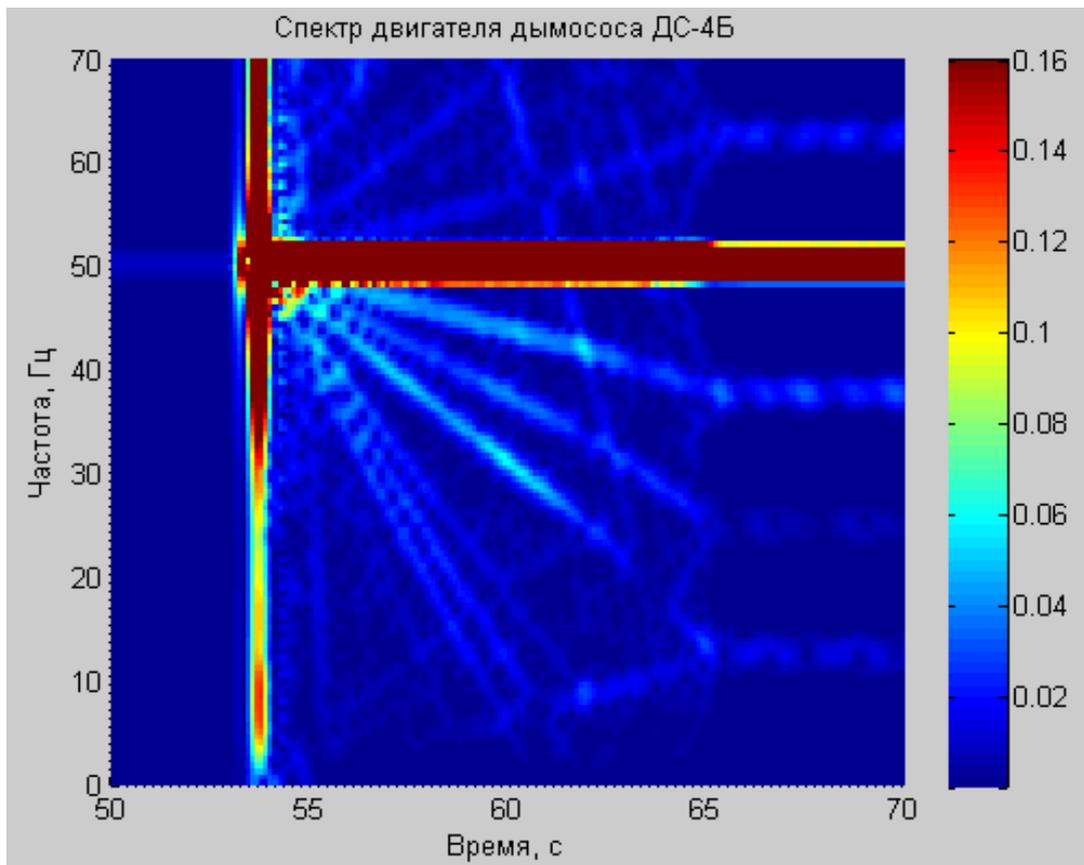


Рис. 4.35. ЧВС ВМП при пуске высоковольтного АД дымососа ДС-4Б на ТЭЦ-2

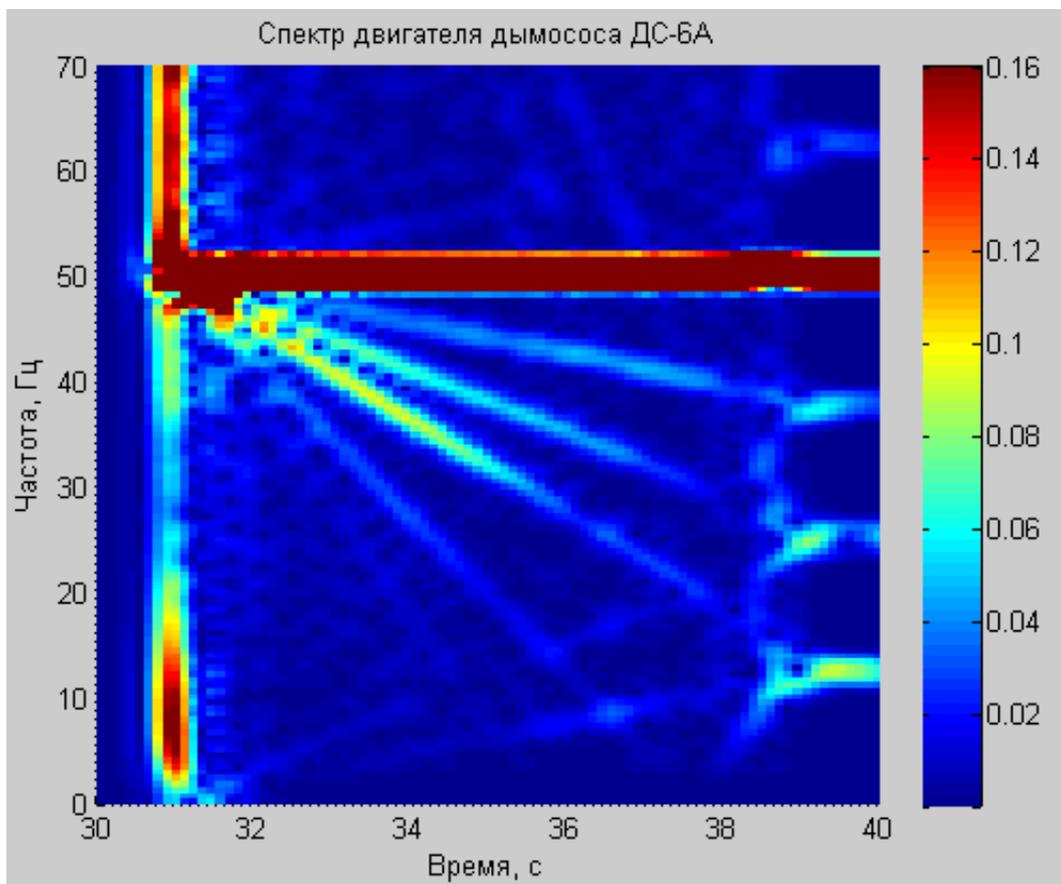


Рис. 4.36. ЧВС ВМП при пуске высоковольтного АД дымососа ДС-6А на ТЭЦ-2

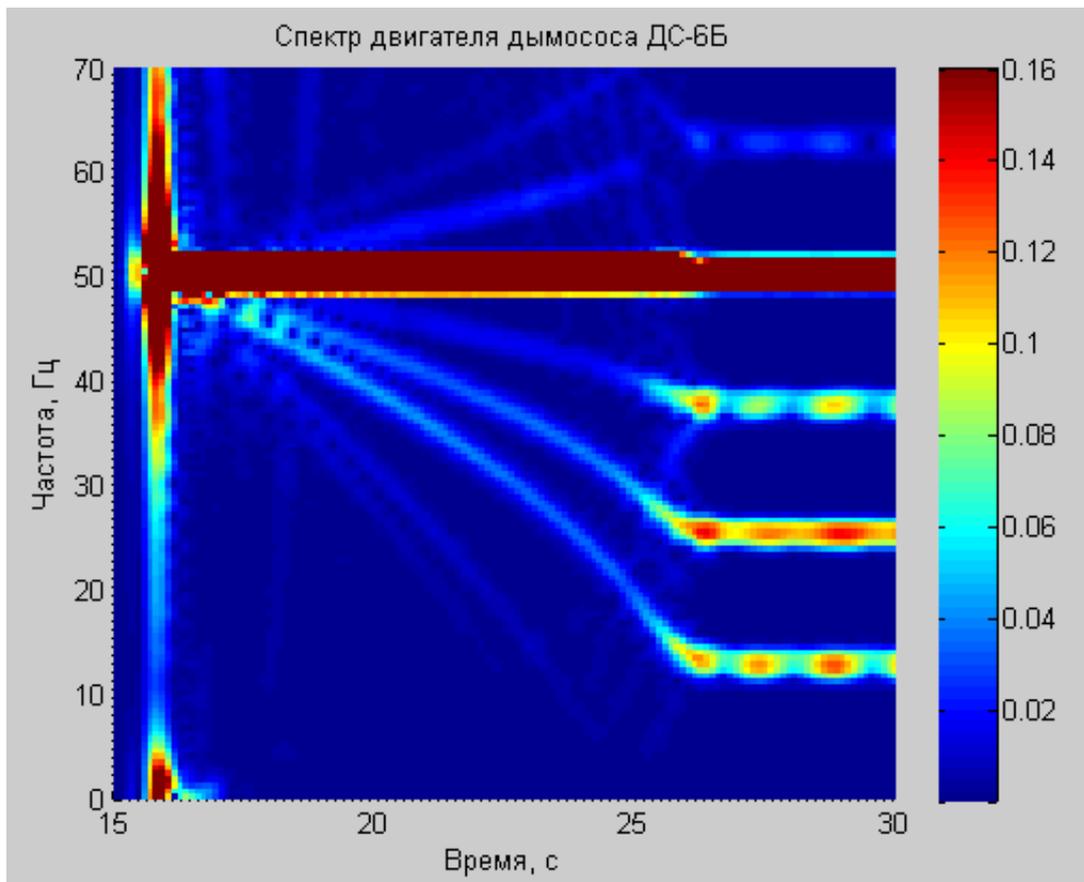


Рис. 4.37. ЧВС ВМП при пуске высоковольтного АД дымососа ДС-6Б на ТЭЦ-2

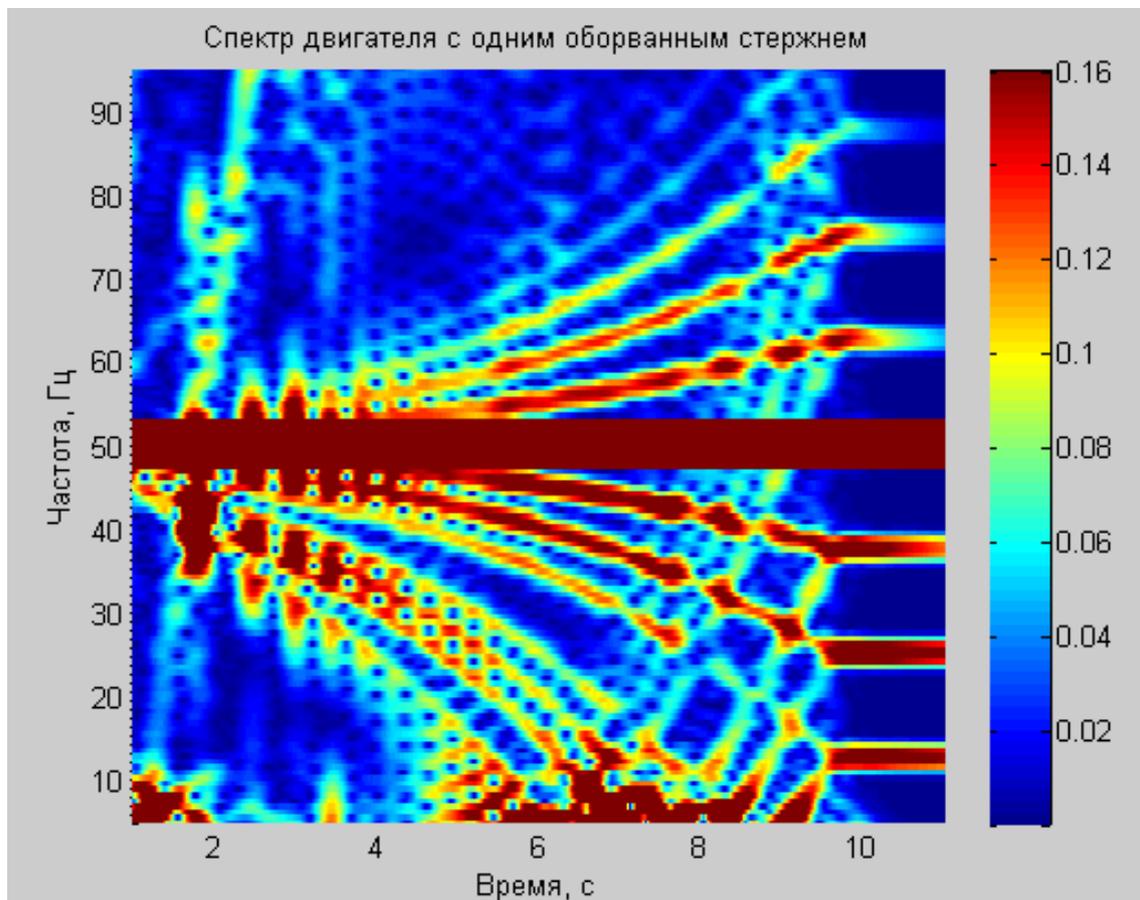


Рис. 4.38. Эталонный ЧВС ВМП высоковольтного АД типа ДАМСО-15-12-8

Таблица 4.6. Значения амплитуд гармоник от ФОР для ВМП на исследуемых АД типа ДАМСО-17-44-8/10У1 и их пороговые значения (мкТл)

Наименование гармоники	ВМП АД дымососа ДС-4А	ВМП АД дымососа ДС-4Б	ВМП АД дымососа ДС-6А	ВМП АД дымососа ДС-6Б	Пороговые значения
ФОР 1-	0,00466	0,0104	0,01438	0,00724	0,0404
ФОР 2-	0,00936	0,00776	0,0059	0,00183	0,0484
ФОР 3-	0,00068	0,00854	0,0098	0,00064	0,0613
ФОР 1+	0,02356	0,04188	0,05063	0,0352	0,0587
ФОР 2+	0,01095	0,03671	0,04794	0,03415	0,0765
ФОР 3+	0,01067	0,0444	0,03196	0,01624	0,0859

Выводы по главе 4

1. На модифицированном экспериментальном стенде, который позволяет исследовать АД с длительным пуском, доказано существование гармоник от ФОР во внутреннем магнитном поле, а также во ВМП и токе статора в режиме пуска. Показано, что во ВМП низковольтного АД типа АИР71А6 с искусственно затянутым пуском наиболее отчетливо проявляются отраженные гармоники от ФОР v - в диапазоне от 0 до 50 Гц. В токе статора при возникновении дефекта резко возрастает амплитуда гармоники от ФОР p -.

2. Косвенно подтверждена корректность разработанных математических моделей высоковольтных АД собственных нужд электростанций с тяжелыми условиями пуска с помощью анализа пусковых сигналов от низковольтного АД типа АИР71А6 с искусственно затянутым пуском. Показано, что для сигнала тока статора амплитуды гармоник от ФОР как при наличии, так и при отсутствии дефектов получились очень близкими на математической модели и реальном АД. Для сигнала ВМП при отсутствии повреждений амплитуды гармоник от ФОР сильно различаются (амплитуды на математической модели значительно ниже), однако при наличии дефекта они достаточно близки друг к другу. Это дает возможность использования математических моделей АД при проведении контроля реальных высоковольтных машин с тяжелыми условиями пуска.

3. Разработана методика проведения контроля технического состояния ОР высоковольтных АД СН электростанций с тяжелыми условиями пуска по

ВМП и току статора на основе разработанного алгоритма для анализа пусковых сигналов. В основе алгоритма использовано ОПФ при построении спектров ВМП и тока статора. Заключение о техническом состоянии АД может производиться на основе модельного анализа для тока статора, для ВМП может быть использована экспертная оценка на основе сравнения амплитуд с пороговыми значениями и анализом тренда изменения амплитуд гармоник от ФОР.

4. Произведена регистрация сигналов тока статора и ВМП на реальных АД дымососов и дутьевых вентиляторов на электрических станциях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3. В ходе анализа подтвержден вывод о наличии гармонических составляющих от ФОР в ЧВС реальных АД с длительными пусками. На примере АД дымососов и дутьевых вентиляторов на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 была произведена апробация разработанной методики.

Материалы четвертой главы опубликованы в работах [127, 131-134, 142, 144, 146, 147, 149].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано влияние отказов высоковольтных асинхронных двигателей, являющихся приводами механизмов собственных нужд, на работу как самой системы собственных нужд, так и электростанции в целом. Показано, что внезапные отказы высоковольтных асинхронных двигателей ряда механизмов собственных нужд могут послужить причиной существенного экономического ущерба, который может достигать нескольких сотен тысяч рублей в год. Выделены три основные составляющие экономического ущерба, связанные с потерями электрической энергии и мощности в системе собственных нужд электростанций при работе асинхронных двигателей с оборванными стержнями обмоток роторов; с полным или частичным снижением вырабатываемой мощности и энергии блоком электростанции; с необходимостью дорогостоящего ремонта или замены высоковольтных асинхронных двигателей при их отказах;

2. Отмечены основные особенности работы высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд по сравнению с двигателями, применяемыми в других областях. Показано, что разработанные в настоящее время методы контроля технического состояния обмоток роторов малоэффективны для высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми условиями пуска. При этом перспективными и малоизученными направлениями, с помощью которых удобно производить контроль таких двигателей, является выявление обрывов стержней обмоток роторов с помощью методов спектрального анализа радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора при его пуске;

3. Исследовано изменение частот гармоник от фиктивной обмотки ротора в сигналах тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в процессе пуска асинхронных двигателей. Разработан алгоритм на базе оконного преобразования Фурье, позволяющий производить обработку нестационарных сигналов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с длительным пуском. Определены необходимые параметры применяемых

оконных функций и самого сигнала. На искусственно созданном сигнале произведена проверка корректности разработанного алгоритма. Показано, что погрешность определения амплитуд гармоник не превышает 10 %;

4. На разработанных в программном комплексе Ansys математических моделях высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций были выделены диагностические признаки повреждения обмоток роторов, заключающиеся в возрастании амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора первых порядков в сигнале радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля при пуске и возрастании амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора порядка, совпадающего с числом пар полюсов, на нижней боковой частоте в сигнале тока статора при пуске. На основании проведенных исследований разработаны методы контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций при пуске по току статора и внешнему магнитному полю. Сравнение разработанных методов по току статора и внешнему магнитному полю с существующими методами контроля в процессе эксплуатации асинхронных двигателей показало значительно более высокую достоверность контроля для первых за счет: исключения влияния ДЭ и поведения нагрузки на результаты контроля; повышения чувствительности к обрыву одного стержня ОР. Соотношение амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора на математической модели поврежденного и исправного высоковольтного асинхронного двигателя системы собственных нужд при пуске составило 118,28 по току статора, по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля – не менее 189,8 для всех гармонических составляющих.

5. Разработана методика проведения контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с длительным пуском в процессе эксплуатации по внешнему магнитному полю и току статора. Определены критерии перехода асинхронных двигателей собственных нужд из исправного состояния в неисправное на базе оценки амплитуд гармонических составляющих от фиктивной обмотки ротора в

сигналах радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля или тока статора и сравнения их с пороговыми значениями, определенными путем математического моделирования асинхронного двигателя с одним оборванным стержнем обмотки ротора. Доказана возможность применения разработанной методики на экспериментальном стенде на низковольтном асинхронном двигателе при подаче пониженного напряжения для искусственного затягивания пуска, а также на реальных высоковольтных асинхронных двигателях собственных нужд с длительным пуском на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 города Иваново.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ВМП – внешнее магнитное поле;

ДЭ – динамический эксцентриситет;

НИД – наружный индуктивный датчик;

ОПФ – оконное преобразование Фурье;

ОР – обмотка ротора;

СН – собственные нужды;

ФОР – фиктивная обмотка ротора;

ЧВС – частотно-временной спектр;

Отраженные гармоники от ФОР – гармоники от ФОР на нижних боковых частотах, отражающиеся в ЧВС от оси скольжения, скорости вращения АД или времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Таджибаев, А.И.** Современные методы и средства диагностирования электромагнитной системы асинхронных двигателей / А.И. Таджибаев, М.П. Цыпкин // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 3: Диагностика, контроль состояния, релейная защита и обслуживание электродвигателей. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 1997. – 50 с.
2. **Иноземцев, Е.К.** Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (часть 1) / Е.К. Иноземцев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.
3. **Завидей, В.И.** К вопросу создания системы мониторинга электрических машин и аппаратов по их техническому состоянию / В.И. Завидей, [и др.] // Энергетик. – 2012. – № 12. – С.15–18.
4. **Седунин, А.М.** Контроль технического состояния асинхронных двигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока / А.М. Седунин, Д.О. Афанасьев, Л.Г. Сидельников // Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. – 2013. – вып. 12. – С. 15–18.
5. **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. – pp. 853-872.
6. **O'Donnell, P.** Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part 3, / P. O'Donnell // IEEE Trans. Ind. Appl., 1987. – vol. IA-23. – № 1. – pp. 153–158.
7. **Siddiqui, K. M.** Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor – A Review / K. M. Siddiqui, K. Sahay, V.K.Giri // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2014. – Vol. 3. – Issue 1. – pp. 6549–6565.

8. **Babu, W.R.** Performance Analysis of Medium Voltage Induction Motor Using Stator Current Profile / W.R. Babu, C.S. Ravichandran, V. Matheswaran // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2015. – Vol. 4. – Issue 4. – pp. 2129–2136.
9. “IEEE Recommended Practice for The Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”. – Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – 383 p.
10. **Zhang, P.** A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors / P. Zhang, T.G. Habetler, B. Lu, Y. Du // IEEE Transactions on Information Theory. – 2011. – №47 (1). – pp. 34–46.
11. **Stefani, A.** Diagnosis of Induction machines Rotor Faults in Time-Varying Conditions, / A. Stefani, A. Bellini, F. Filippetti // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56. – No. 11. – pp. 4548–4556.
12. **Рассказчиков, А.В.** Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – ЛПИ, 1982. – 195 с.
13. **Андреева, О.А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций: монография / О.А. Андреева. – Павлодар: Кереку, 2015. – 142 с.
14. **Jahić, A.** Detection of Failures on the High-Voltage Cage Induction Motor Rotor / A. Jahić, Hederić Z., Atić M. // International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. – Vol. 6. – № 1. – 2015. – pp. 15–21.
15. **Аббасова, Э. М.** Собственные нужды тепловых электростанций / Э. М. Аббасова [и др.]; под ред. Ю. М. Голоднова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
16. **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.

17. **Culbert, I.** Signature analysis for online motor diagnostics / I. Culbert, J. Letal // PPIС-0187. – 2015. – pp. 1–10.
18. **Сыромятников, И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с: ил.
19. **Никиян, Н.Г.** Освоение и оценка методов электромагнитной диагностики эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей / Н.Г. Никиян, Д.В. Сурков // Вестник ОГУ. – №2. – 2005. – С. 163–166.
20. **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.
21. **Negrea, M.** Electromagnetic flux-based condition monitoring for electrical machines / M. Negrea, P. Jover, A. Arkkio // 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. – Vienna, 2005. – pp. 1–6.
22. **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. – No. 1. – pp. 165–171.
23. **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.
24. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. – М.: Стандартиформ, 2010. – 42 с.
25. **Çalis, H.** Vibration and motor current analysis of induction motors to diagnose mechanical faults / H. Çalis // Journal of measurements in engineering. – 2014. – Vol 2. – Issue 4. – pp. 190–198.
26. **Praveenkumar, T.** Comparison of Vibration, Sound and Motor Current Signature Analysis for Detection of Gear Box Faults / T. Praveenkumar, M. Saimurugan, K. I. Ramachandran // International Journal of Prognostics and Health

Management. – 2017. – Vol 8. – Iss. 2. – 10 p. Available at: https://www.phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/phm_submission/2017/ijphm_17_032.pdf (Accessed 04 September 2019).

27. **Alwodai, A.** A Study of Motor Bearing Fault Diagnosis using Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals / A. Alwodai, T. Wang, Z. Chen, F. Gu, R. Cattley, A. Ball // Journal of Signal and Information Processing. – 2013. – №4. – pp. 72–79.

28. **Русов, В.А.** Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов. – Пермь, 1996. – вып. №1. – 176 с.

29. **Русов, В.А.** Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В.А. Русов. – Пермь. – 2012. – 252 с.

30. **Лукьянов, А.В.** Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей / А.В. Лукьянов, Ю.С. Мухачев, И.О. Бельский // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22) – С. 61–69.

31. **Барков, А. В.** Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004. – 152 с.

32. **Gritli, Y.** Vibration Signature Analysis for Rotor Broken Bar Diagnosis in Double Cage Induction Motor Drives / Y. Gritli, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, F. Filippetti, C. Rossi // 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013. – pp. 1814–1820.

33. **Сафин, Н. Р.** Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: Дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.

34. **Шевчук, В.А.** Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя / В.А. Шевчук, А.С. Семенов // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – №3. – С. 419–423.

35. **Сафин, Н. Р.** Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н. Р. Сафин, [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 34–39.
36. **А.С. 1257577 (СССР).** Устройство для контроля целостности стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя / Брюханов Г.А., Князев С.А. – Оpubл. в Б. И., 1986. – №34.
37. **А.С. 800906 (СССР).** Способ определения повреждения стержней беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей / Брюханов Г.А., Князев С.А. – Оpubл. в Б. И., 1981. – №4.
38. **Сурков, Д. В.** Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей / Д. В. Сурков: диссертация... канд. тех. Наук : 05.09.01. – Оренбург, 2008. – 127 с.
39. **Бурцев, А.Г.** Спектральный анализ тока статора трехфазного асинхронного двигателя при аварийных режимах работы [Электронный ресурс] / А.Г. Бурцев, Т.В. Дягилева, А.Г. Пан // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №2. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_73_burtsev.pdf_67f02fa8af.pdf (дата обращения: 04.09.2019).
40. **Глазырина, Т.А.** Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Томск, 2012. – 120 с.
41. **Вейнреб, К.** Диагностика ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / К. Вейнреб // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 4. – С. 133–154.
42. **Вейнреб, К.** Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / К. Вейнреб // Электричество. – 2012. – № 7. – С. 51–57.
43. **Купцов, В. В.** Разработка метода диагностирования АД на основе конечно-элементной модели / В. В. Купцов: Дис... канд. тех. наук: 05.09.03. – Магнитогорск, — 2010. —142 с.

44. **Mehala, N.** Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Motors / N. Mehala // International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. – 2012. – Vol. 1. – № 3. – pp. 1629–1633.
45. **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.
46. **Guedidi, S.** Broken Bar Fault Diagnosis of Induction Motors Using MCSA and Neural Network / S. Guedidi, S.E.Zouzou, W. Laala, M. Sahraoui, K. Yahia // IJRASET. – 2015. – Vol. 3. – Issue IV. – pp. 1145–1152.
47. **Fireteanu, V.** From the 2D to 3D Finite Element Analysis of the Broken Bar Fault in the Squirrel-Cage Induction Motors / V. Fireteanu, A. Constantin // ICATE. – 2016. – pp. 1–10. – DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754647.
48. **Oviedo, S.** Motor current signature analysis and negative sequence current based stator winding short fault detection in an induction motor / S. Oviedo, J. Quiroga, C. Borrás // Dyna. – 2011. – Vol. 78. – № 170. – pp. 214–220.
49. **Lane, M.** Investigation of Motor Current Signature Analysis in Detecting Unbalanced Motor Windings of an Induction Motor with Sensorless Vector Control Drive / M. Lane, D. Ashari, F. Gu, A.D. Ball // Vibration Engineering and Technology of Machinery. Mechanisms and Machine Science. – 2015. – Vol. 23. – pp. 801–810.
50. **Singhal, A.** Bearing fault detection in induction motor using motor current signature analysis / A. Singhal, A. Khandekar // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2. – pp. 3258–3264.
51. **Sonje, D. M.** Rotor Cage Fault Detection in Induction Motors by Motor Current Signature Analysis / IJCA Proceedings on International Conference in Computational Intelligence (ICCI). – 2012. – Vol. 2. – pp. 22–26
52. **Thakur, A.** Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis / A. Thakur, S. Wadhvani, A.K. Wadhvani // International Journal of Computer Science and Information Technology Research. – 2015. – Vol. 3. – Issue 3. – pp 309–313.

53. **Cusido, J.** New Fault Detection Techniques for Induction Motors / J. Cusido, J. Rosero, E. Aldabas, J.A. Ortega, L. Romeral // *Electrical Power Quality and Utilization, Magasine.* – 2006. – Vol. II. – № 1. – pp. 39–46.
54. **Turk, N.** Fault Diagnosis of Induction Motor using MCSA / N. Turk // *International Journal of Electrical and Computer Engineering.* – 2016. – Vol. 8. – pp. 13–18.
55. **Rincy, R.** Fault detection of Induction Motor using Envelope Analysis / R. Rincy // *International Journal of Advancements in Research & Technology.* – 2013. – Vol. 2. – Issue 7. – pp. 258–262.
56. **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. – No 14. – pp. 36–43.
57. **Bouras, A.** Prediction of the mass unbalance of a variable speed induction motor by stator current multiple approaches / A. Bouras, S. Bouras, S. Kerfali // *Turk J Elec Eng & Comp Sci.* – 2018. – №26. – pp. 1056–1068.
58. **Henao, H.** A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor / H. Henao, C. Demian, G.A. Capolino // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2003. – vol. 39. – pp. 1511–1516.
59. **Fiser, R.** Magnetic field analysis of induction motor with rotor faults / R. Fiser, S. Ferkolj // *Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering.* – 1998. – vol. 17. – № 1/2/3. – pp. 206–211.
60. **Mini V. P.** Rotor Fault Analysis of an Induction Motor using FEM / V. P. Mini, S. Ushakumari // *2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES).* – 2012. – pp. 1–7.
61. **Patni, R.** Review paper on Stator and Rotor Fault Diagnosis of 3-Phase Induction Motors / R. Patni, M. M. Ansari // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).* – 2018. – vol. 5. – Issue 4. – pp. 180–185.
62. **Gupta, K.** A Review on Fault Diagnosis of Induction Motor using Artificial Neural Networks / K. Gupta, A. Kaur // *International Journal of Science and Research (IJSR).* – 2014. – Vol. 3. – Issue 7. – pp. 680–684.

63. **Arabaci, H.** Detection of Rotor Bar Faults by Using Stator Current Envelope / H. Arabaci, O. Bilgin // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2011. – Vol. II. – pp.1432–1435.
64. **Priyanka, D.** Modeling and Simulation of Rotor Side Fault Diagnosis of Induction Motor by Using Fuzzy Based Controlled Identifier / D. Priyanka, K. Dharmendra, S. Durga // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2015. – Vol. 3. – Issue 3. – pp. 1521–1530.
65. **Constantin, A.** Early Detection of a Squirrel-cage Bar Breakage through Harmonics of Stator Currents and of Magnetic Field in the Motor Proximity. // A. Constantin, V. Fireteanu // The 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. – Bucharest, Romania, 2017. – pp. 392–397.
66. **Rodriguez-Cortes, H.** Model-Based Broken Rotor Bar Detection on an IFOC Driven Squirrel Cage Induction Motor / H. Rodriguez-Cortes, C. N. Hadjicostis and A. M. Stankovic // Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston. – Massachusetts. – 2004. – pp. 3094–3099.
67. **Mirafzal, B.** Induction Machine Broken-Bar Fault Diagnosis Using the Rotor Magnetic Field Space-Vector Orientation / B. Mirafzal, N. A. O. Demerdash // IEEE Transactions on industry applications. – 2004. – Vol. 40. – № 2. – pp. 534–542.
68. **Vaimann, T.** Detection of Broken Rotor Bars in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor using Fast Fourier Transform / T. Vaimann, A. Kallaste // 10th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”. – Pärnu, Estonia, 2011. – pp. 52–56.
69. **Kalaskar, C. S.** 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.
70. **Seungdeog, C.** Performance-Oriented Electric Motors Diagnostics in Modern Energy Conversion Systems / Seungdeog C. [and other] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59. – №. 2. pp. 1266–1277.

71. **Chen, S.** Induction Machine Broken Rotor Bar Diagnostics Using Prony Analysis: A Thesis ... for the Degree of Master of Engineering Science / S. Chen – Adelaide, Australia, 2008. – 127 p.
72. **Shukla, S.** Motor Current Signature Analysis for Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Induction Motors using Interval Type-2 Fuzzy Logic / S. Shukla, M. Jha, M. F. Qureshi, / International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJSET). – 2014. – Vol. 1. – Issue 5. – pp. 84–95.
73. **Pineda-Sanchez M.** Partial Inductance Model of Induction Machines for Fault Diagnosis / M. Pineda-Sanchez [and other] // Sensors (Basel). – 2018. – Vol. 18. – Iss. 7. – doi: 10.3390/s18072340. – Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6069024/pdf/sensors-18-02340.pdf> (Accessed 04 September 2019).
74. **Gyftakis, K. N.** Comparative Experimental Investigation of Broken Bar Fault Detectability in Induction Motors / K. N. Gyftakis, [and other] // 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). – 2015. – pp. 461 – 467.
75. **Liu, D.** Off-the-grid compressive sensing for broken-rotor-bar fault detection in squirrel-cage induction motors / D. Liu, D. Lu // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48. – Issue 21. – pp. 1451–1456.
76. **Azouzi, K.** Use of a combined SVD-Kalman filter approach for induction motor brokenrotor bars identification // K. Azouzi, A. H. Boudinar, F. A. Aimer, A. Bendiabdellah // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2018. – Vol. 17. – № 1. – pp. 85–101.
77. **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.
78. **Pezzani, C.** Detecting Broken Rotor Bars With Zero-Setting Protection / C. Pezzani, P. Donolo, G. Bossio, M. Donolo et al // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50. – Issue 2. – pp. 1373–1384.

79. **Poncelas, O.** Motor Fault Detection Using a Rogowski Sensor Without an Integrator. / O. Poncelas, J.A. Rosero, J. Cusidó, J. A. Ortega, L. Romeral // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2009. – Vol. 56. – № 10. – pp. 4062–4070.
80. **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. OndĚej // International Power Electronics and Motion Control Conference. – 2016. – pp. 532–537.
81. **Jokic, S.** Condition assessment of the induction motor based on vibration and current signature analyses / S. Jokic and S. Ikic // International Electrical Testing Association Journal NETAworld. – 2018. – pp. 66–70.
82. **Tavner, P.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Tavner et al. – The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 543 p.
83. **Miljković, D.** Brief Review of Motor Current Signature Analysis / D. Miljković // HEP. – Zagreb, Croatia, 2015. – pp. 15–26.
84. **Misra, R.** An Experimental Study of Rotor Fault Detection Using Motor Current Signature Analysis Based on Neural Networks / R. Misra, G. L. Pahuja // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2015 –Vol. 79. – pp. 25–36.
85. **Bhowmik, P.S.** Fault Diagnostic and Monitoring Methods of Induction Motor: a Review / P. S. Bhowmik, S. Pradhan and M. Prakash // International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE). – 2013. – Vol. 1. – № 1. – pp. 1–18.
86. **Shashidhara, S.M.** Stator Winding Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motor by Park's Vector Approach / S.M. Shashidhara, S. Raju // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2. – Issue 7. – pp. 2901–2906.
87. **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.

88. **Pineda-Sanchez, M.** Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars. / M. Pineda-Sanchez, [and other] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009 – Vol. 56. – № 11. – pp. 4557–4570.

89. **Сивокобыленко, В.Ф.** Диагностика стержней двухклеточных и глубокопазных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей / В.Ф. Сивокобыленко, Д.И. Кузьменко, С.П. Яременко // Научные труды ДонНТУ. – 2011. – № 10 (180). – С. 148–152.

90. 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.

91. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

92. 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.

93. **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. – No. 2. – pp. 125–132.

94. **Ceban, A.** Finite Element Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors Based on Low Frequency Harmonics of the Near-Magnetic Field / A. Ceban, V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca P. Taras // IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, Fault Modeling in Electrical Machines, Power Electronics and Drives. – 2011. – pp. 192–198.

95. **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.

96. **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.

97. **Назарычев, А.Н.** Экспериментальное исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя для контроля обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, Е.М. Новоселов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 1. – С. 10–15.

98. **Новоселов, Е. М.** Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Иваново, 2018. – 234 с.

99. **Jarzyna, W.** Diagnostic Characteretics of Axial Flux in an Induction Machine / W. Jarzyna // Electrical Machines and Drives, Conference Publication. – 1995. – № 4. – pp. 141–146.

100. **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.

101. **Kokko, V.** 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.

102. **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. – No. 5. – pp. 2082–2093.

103. **Devillers, E.** An improved 2D subdomain model of squirrel cage induction machine including winding and slotting harmonics at steady state / E. Devillers, J. Le Besnerais, T. Lubin, M. Hecquet, J. Lecointe // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Vol. 54. – Iss. 2. – pp. 1–12.

104. **Алексеевко, А.Ю.** Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего

электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденев, В.Г. Тонких, С.О. Хомутов // Вестник АлтГТУ. – 2006. – № 2. – С. 9–13.

105. **Romary, R.** Electrical Machines Fault Diagnosis by Stray Flux Analysis / R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecoite and J. F. Brudny // 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). – Paris, 2013. – pp. 247–256.

106. **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. Seban // Proc. of XV th ISEF Symposium, 2011.

107. **Синельников, А.М.** Метод определения технического состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в процессе пуска / А.М. Синельников, В.В. Боннет // Вестник КрасГАУ. – 2010. – №4. – с. 201–203.

108. **Al Kazzaza, S. A.** Experimental Investigations on Induction Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis using Digital Signal Processing Techniques / S. A. Al Kazzaza, G.K. Singh // Electric Power Systems Research. – 2003. – pp. 197–221.

109. **Чернов, Д. В.** Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы / Д. В. Чернов: Автореф. дис... канд. тех. наук. – Ульяновск, 2005. – 20 с.

110. **Тонких, В. Г.** Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля / В. Г. Тонких: Автореф. дис... канд. тех. наук. – Барнаул, 2009. – 20 с.

111. **Айфичер, Э. С.** Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. : пер. с англ. / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

112. **Купцов, В. В.** Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы / В. В. Купцов, А. С. Горзунов, А. С. Сарваров // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – № 34. – с. 60–67.

113. **Singh, S.** Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems / S. Singh, A. Kumar, N. Kumar // 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC), Procedia Materials Science 6. – 2014. – pp. 171–177.
114. **Constantin, A.** Efficiency in the Detection of Three Important Faults in Induction Motors through External Magnetic Field // A. Constantin, V. Fireteanu // The 9th international symposium on advanced topics in electrical engineering, Bucharest, Romania. – 2015. – pp. 430–435.
115. **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.
116. **Fis'er, R.** Calculation of Magnetic Field Asymmetry of Induction Motor with Rotor Faults / R. Fis'er, S. Ferkolj // 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON. – 1998. – Vol. 2. – pp. 1175–1179.
117. **Воробьев, Н.П.** Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // Ползуновский вестник. – 2011. – №2 (2). – С. 261–269.
118. **Jocić, S.** Decentralized system for fault detection in induction motors / S. Jocić, Ž. Kanović, M. R. Rapaić, Z. D. Jeličić, V. Turkulov // Journal on Processing and Energy in Agriculture. – 2018. – №2. – pp. 69–72.
119. **Сергиенко, А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
120. **Wang, Z.** Fault Identification of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using an Improved Cyclic Modulation Spectral Analysis / Z. Wang, J. Yang, H. Li, D. Zhen, Y. Xu, F. Gu // Energies. – 2019. – № 12(17). – pp. 1–20. – Available at: <https://doi.org/10.3390/en12173279><https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3279> (Accessed 30 July 2021).
121. **Fernandez-Cavero, V.** Diagnosis of Broken Rotor Bars during the Startup of Inverter-Fed Induction Motors Using the Dragon Transform and Functional ANOVA / V. Fernandez-Cavero, L.A. García-Escudero, J. Pons-Llinares, M.A. Fernández-

Temprano, O. Duque-Perez, D. Morinigo-Sotelo // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – pp. 1–20. – Available at: <https://doi.org/10.3390/app11093769> (Accessed 30 July 2021).

122. **Ramu, S.K.** Broken rotor bar fault detection using Hilbert transform and neural networks applied to direct torque control of induction motor drive / S.K. Ramu, G.C.R. Irudayaraj, S. Subramani, U. Subramaniam // IET Power Electronics. – 2020. – Vol. 13. – Issue 15. – pp. 3328–3338.

123. **Asad, B.** Improving Legibility of Motor Current Spectrum for Broken Rotor Bars Fault Diagnostics / B. Asad, T. Vaimann, A. Kallaste, A. Rassõlkin, A. Belahcen, M. N. Iqbal // Electrical, Control and Communication Engineering. – 2019. – vol. 15. – № 1. – pp. 1–8. – Available at: <https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0001> (Accessed 30 July 2021).

124. **Kechida, R.** Broken Rotor Bars Fault Detection in Induction Motors Using FFT: Simulation and Experimentally Study / R. Kechida, A. Menacer, H. Cherif // Algerian Journal of Engineering and Technology. – 2019. – vol. 1. – № 1. – pp. 19–24.

125. **Пырко, С.А.** Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей / С.А. Пырко, А.М. Митиогло, Е.Н. Ишметьев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 80–89.

126. **Колобов, А.Б.** Основы теории и практики вибродиагностики / А.Б. Колобов. – Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина". – Иваново, 2014. – 248 с.

127. **Новоселов, Е.М.** Оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов, А.С. Страхов, И.Н. Сулыненков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2018. – Вып. 3. – С. 38–46.

128. **Новоселов, Е.М.** Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного

электродвигателя / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов, А.С. Страхов, И.Н. Сулыненков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2018. – Вып. 4. – С. 44–53.

129. **Савельев, В.А.** Метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций при пуске / В.А. Савельев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.А. Скоробогатов // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2019. – Вып. 4. – С. 31–44.

130. **Назарычев, А.Н.** Оценка последствий отказа асинхронных электродвигателей вследствие обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов / А.Н. Назарычев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.Н. Морозов, А.А. Скоробогатов // Электричество. – 2021. – № 9. – С. 12–20.

131. **Назарычев, А.Н.** Экспериментальное определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов, А.А. Пугачев // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 3–11.

132. **Nazarychev, A.N.** Experimental Determination of Diagnostic Signs of Damage to the Rotor Windings of High-Voltage Power Plant Motors in Startup Mode / A.N. Nazarychev, A.A. Pugachev, E.M. Novoselov, D.A. Polkoshnikov, A.S. Strakhov, A.A. Skorobogatov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, T. 56, № 5, pp. 408–416.

133. **Назарычев, А.Н.** Метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов // Дефектоскопия. – 2020. – № 8. – С. 49–55.

134. **Nazarychev, A.N.** A Method for Monitoring the Condition of Rotor Windings in Induction Motors During Startup Based on Stator Current / A.N. Nazarychev, E.M. Novoselov, D.A. Polkoshnikov, A.S. Strakhov, A.A. Skorobogatov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, T. 56, № 8, pp. 661–667.

135. Способ выявления оборванных стержней в короткозамкнутой обмотке

ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2687881 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / **А.С. Страхов**, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, Д.С. Корнилов, Н.К. Швецов, А.А. Скоробогатов. – № 2018121860, заявл. 13.06.2018, опубл. 16.05.2019, бюл. № 14.

136. Способ выявления оборванных стержней в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2724988 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / **А.С. Страхов**, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.Н. Назарычев, Н.С. Чумаков, А.А. Скоробогатов. – Заявка № 2019121731, заявл. 09.07.2019, опубл. 29.06.2020, бюл. № 19.

137. **Strakhov, A.S.** The Development of Health Monitoring Techniques of the Induction Motors in Russia and Abroad / A.S. Strakhov, A.A. Skorobogatov, A.A. Prokhorova // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 225–227.

138. **Strakhov A.S.** The Modern Trends of the Health Monitoring Techniques of Induction Motors / A.S. Strakhov, A.A. Skorobogatov, A.A. Prokhorova // СОЦИУМ. НАУКА. ОБРАЗОВАНИЕ: Материалы I Региональной молодежной научно-практической конференции [Электронный ресурс] / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – С. 35–37.

139. **Страхов, А.С.** Анализ возможности применения программного комплекса Ansys в целях контроля состояния обмотки ротора асинхронного двигателя / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // Радиотехника. Электротехника и энергетика: тез. докл. XXIII Международной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., Москва). В 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 29.

140. **Назарычев, А.Н.** Анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, А.С.

Страхов, А.А. Скоробогатов, Н.В. Коровкин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017 – Т. 23. – № 4. – С. 98–109.

141. **Назарычев, А.Н.** Обнаружение повреждения обмотки ротора асинхронного электродвигателя с помощью моделирования методом конечных элементов / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, Е.М. Новоселов, А.С. Страхов, Д.А. Полкошников // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 48. Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики: сб. докл.. – СПб: ПЭИПК, 2017. – С. 151–161.

142. **Новоселов, Е.М.** К вопросу существования внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов // Двенадцатая международная науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: мат. конф.. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2017. – Т. 3. – С. 267–269.

143. **Страхов, А.С.** Использование внешнего магнитного поля для контроля состояния обмотки ротора при пуске / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, И.Е. Веселова, А.А. Скоробогатов // Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018», Т. 3. – Иваново, 2018. – С. 140–141.

144. **Страхов А.С.** Экспериментальное доказательство существования признаков повреждения электродвигателя с длительным пуском во внешнем магнитном поле / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, А.Н. Морозов, А.А. Скоробогатов // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2019 – С. 94–97.

145. **Страхов, А.С.** Сравнение тангенциальной и радиальной составляющих внешнего магнитного поля как диагностических сигналов повреждения обмотки ротора электродвигателя / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, Н.С. Чумаков // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново,

2019. – С. 81–85.

146. **Корнилов, Д.С.** Математическая модель высоковольтного асинхронного двигателя собственных нужд электростанций в программном комплексе Ansys / Д.С. Корнилов, А.С. Страхов, Н.С. Чумаков, Е.М. Новоселов, А.А. Скоробогатов // Материалы четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019», Т. 3. – Иваново, 2019. – С. 99.

147. **Страхов, А.С.** Исследование сигналов внутреннего магнитного поля асинхронных электродвигателей в пусковом режиме / А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов // Материалы четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019», Т. 3. – Иваново, 2019. – С. 96.

148. **Морозов, А.Н.** Анализ экономического ущерба электростанции вследствие повреждений обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд / А.Н. Морозов, А.С. Страхов, Н.С. Чумаков, А.А. Скоробогатов // Материалы пятнадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020», Т. 3. – Иваново, 2020. – С. 109.

149. **Страхов, А.С.** Практическое применение методов определения повреждения в обмотке ротора электродвигателя по внешнему магнитному полю и току статора / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, М.А. Захаров, А.Б. Колобов, А.А. Скоробогатов // Материалы Международной (XXI Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2021 – С. 75–78.

150. **Страхов, А.С.** Анализ потерь в высоковольтных электродвигателях собственных нужд электростанций при повреждении обмоток роторов / А.С. Страхов, А.Н. Морозов, Д.А. Полкошников, А.А. Скоробогатов // Материалы Международной (XXI Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2021 – С. 107–110.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Оценка влияния величины питающего напряжения на время пуска асинхронного двигателя

Первоначальная задача при исследовании спектров АД – выбор необходимой величины питающего напряжения для получения оптимального времени пуска. Для этих целей была произведена серия пусков АД типа АИР71А6 на разном напряжении (от 380 В до минимального напряжения, при котором пуск двигателя проходил успешно) при различной нагрузке АД (холостой ход, пуск с установленным шкивом и пуск с подключенным генератором переменного тока). Также для оценки параметров двигателя при подаче пониженного напряжения регистрировались значения режимных параметров (фазного напряжения, тока статора и т.д.) после окончания пускового режима. Значения режимных параметров АД приведены в приложении 3 для всех трех рассматриваемых режимов при установке одного из исправных роторов и ротора с одним оборванным стержнем. Результаты измерения времени пуска АД при различных величинах питающего напряжения представлены в таблице П.1.1 для АД с одним оборванным стержнем и исправной ОР. Для наглядности графики зависимостей продолжительности пуска от величины питающего напряжения для двигателя с одним оборванным стержнем представлены на рис. П.1.1-П.1.3.

Из полученных графиков и таблиц видно, что уменьшение величины питающего напряжения позволяет достигнуть времени пуска, составляющего не менее 9 секунд для любого из рассматриваемых режимов пуска. При этом с точки зрения времени пуска оптимальным режимом можно считать пуск АД на напряжении 30 В при установке на валу шкива, поскольку в этом режиме время пуска составляет более минуты, что позволяет легко обработать сигнал с помощью разработанного алгоритма.

Таблица П.1.1. Время пуска двигателей при различных величинах питающего напряжения

Исправный АД, пуск в режиме ХХ	$U_{л, В}$	25	30	35	40	45	50	380	-	-	-	-	-
	$T_{п, с}$	13	7	4	3.5	2.5	2	0.02	-	-	-	-	-
Исправный АД, пуск со шкивом	$U_{л, В}$	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	380
	$T_{п, с}$	92	31	20	15	12	8	5	4	3	2.5	2	0.06
Исправный АД, пуск с генератором переменного тока	$U_{л, В}$	100	110	120	130	140	150	160	170	200	380	-	-
	$T_{п, с}$	10	6	5	4	3	2.5	2	1.5	1	0.2	-	-
АД с одним оборванным стержнем, пуск в режиме ХХ	$U_{л, В}$	25	30	35	40	45	50	380	-	-	-	-	-
	$T_{п, с}$	10	6.5	3.5	2.5	2	1.5	0.02	-	-	-	-	-
АД с одним оборванным стержнем, пуск со шкивом	$U_{л, В}$	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	380
	$T_{п, с}$	105	40	22	16	12	8.5	6	4	4	3	3	0.06
АД с одним оборванным стержнем, пуск с генератором переменного тока	$U_{л, В}$	100	110	120	130	140	150	160	170	200	380	-	-
	$T_{п, с}$	9	6	5	4	3	3	2	2	1	0.2	-	-

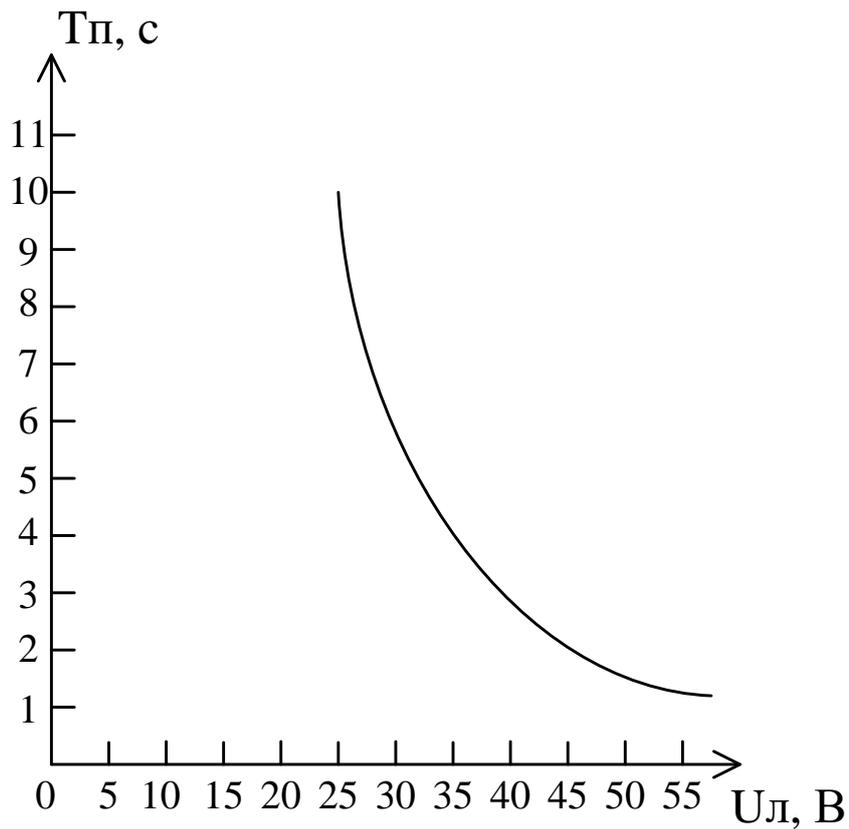


Рис. П.1.1. Зависимость времени пуска АД без установленных на валу механизмов от величины питающего напряжения

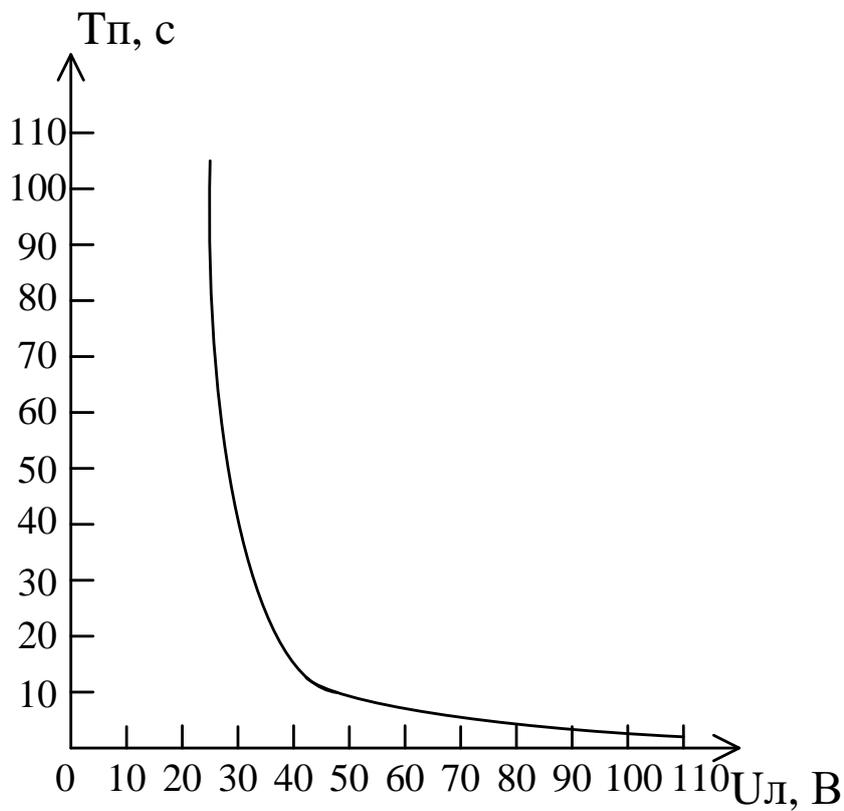


Рис. П.1.2. Зависимость времени пуска АД с установленным шкивом от величины питающего напряжения

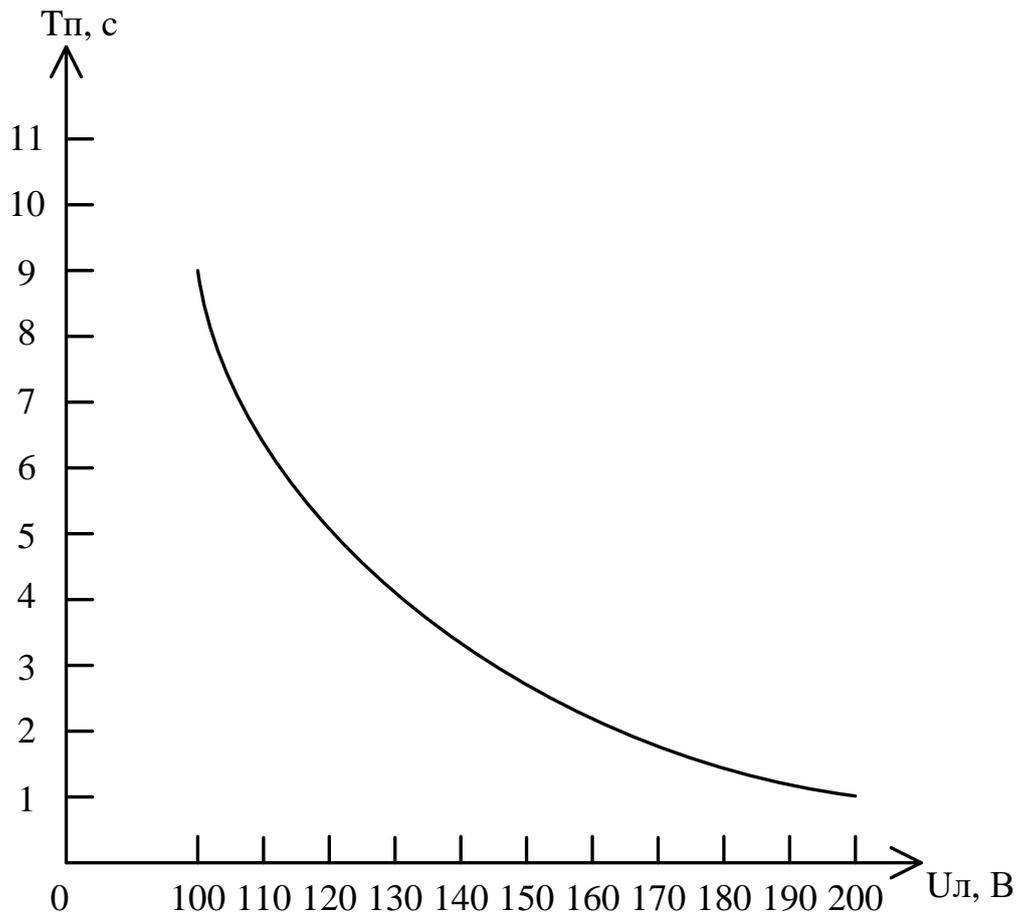


Рис. П.1.3. Зависимость времени пуска АД с подключенным генератором переменного тока от величины питающего напряжения

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Режимные параметры асинхронного двигателя АИР71А6 при подаче пониженного напряжения в различных режимах

Значения режимных параметров АД в установившемся режиме при различных режимах пуска АД (без установленного механизма на валу – режим 1, с установленным на валу шкивом – режим 2, с подключенным генератором переменного тока – режим 3) при различных значениях напряжения приведены в таблицах П.2.1-П.2.3 при установке ротора с одним оборванным стержнем, а также в таблицах П.2.4-П.2.6 при установке исправного ротора. На примере АД с исправной ОР для сравнения приведены также значения параметров при подаче номинального напряжения.

Таблица П.2.1. Параметры АД с обрывом одного стержня в режиме 1

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
50	30,5	30,6	30,8	0,15	0,15	0,15	2,4	2,8	2,4	0,6
45	27,7	27,7	27,8	0,14	0,15	0,14	2,4	2,4	2,4	0,68
40	24,5	24,6	24,7	0,14	0,14	0,14	2,4	2,4	2,4	0,75
35	21,7	21,9	22,1	0,13	0,14	0,13	2,4	2,4	2,4	0,86
30	18,9	18,8	19	0,14	0,14	0,14	2,4	2,4	2,4	1
25	15,6	16,4	16	0,16	0,17	0,16	2,4	2,4	2,4	1
20	12,8	13,2	13	0,23	0,24	0,23	2,4	2,4	2,4	0,86

Таблица П.2.2. Параметры АД с обрывом одного стержня в режиме 2

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
100	59,7	59,4	60,3	0,27	0,27	0,27	4	4,4	4,4	0,27
90	53,8	53,8	54,4	0,24	0,25	0,24	3,6	4	4	0,3
80	48	47,5	48,8	0,22	0,22	0,22	3,2	3,6	3,6	0,35
70	41,8	42,4	42,6	0,19	0,2	0,2	2,8	3,2	3,2	0,43
60	36,3	37	37,5	0,17	0,18	0,17	2,8	3,2	2,8	0,46
50	30,8	30,7	31	0,15	0,16	0,15	2,8	2,8	2,8	0,64
45	27,5	27,8	27,7	0,15	0,15	0,15	2,8	2,8	2,8	0,7
40	24,4	24,5	24,6	0,14	0,15	0,14	2,4	2,8	2,4	0,86

Продолжение таблицы П.2.2.

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
35	21,3	21,9	22,1	0,14	0,15	0,14	2,4	2,8	2,4	0,86
30	18,8	19	19	0,15	0,15	0,15	2,4	2,4	2,4	1
25	15,9	16,5	16,4	0,18	0,19	0,18	2,8	2,8	2,8	1

Таблица П.2.3. Параметры АД с обрывом одного стержня в режиме 3

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
100	59,1	59,8	60,2	0,36	0,37	0,37	15,2	15,6	15,6	0,73
110	64,8	65,1	65,6	0,36	0,36	0,36	14,8	15,6	15,6	0,66
120	70,4	70,3	70,7	0,37	0,37	0,37	15,6	15,6	15,6	0,61
130	76,4	76,2	76,3	0,38	0,38	0,38	15,6	16	16	0,55
140	81,5	81,4	81,6	0,39	0,4	0,4	16	16,4	16	0,51
150	87,1	88,4	88,1	0,41	0,42	0,42	16	17,2	16,4	0,46
160	93,2	93,5	93,7	0,43	0,44	0,44	16,4	18	16,4	0,42
170	98,5	99,2	99,1	0,46	0,47	0,47	19,2	20,4	19,2	0,42
200	115	116,8	116,3	0,53	0,55	0,55	20,8	22,8	20,8	0,35

Таблица П.2.4. Параметры АД с исправной ОР в режиме 1

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
50	30,6	30,6	30,6	0,14	0,14	0,14	2,4	2,4	2,4	0,6
45	28	28	28	0,13	0,13	0,13	2,4	2,4	2,4	0,66
40	24,5	24,5	24,5	0,13	0,13	0,13	2,4	2,4	2,4	0,8
35	22	22	22	0,13	0,13	0,13	2,4	2,4	2,4	0,85
30	19	19	19	0,14	0,14	0,14	2,4	2,4	2,4	1
25	16	16	16	0,16	0,16	0,16	2,4	2,4	2,4	1
20	13	13	13	0,22	0,22	0,22	2,4	2,4	2,4	0,9
380	219	219	220	1,27	1,27	1,27	47,6	52,4	50,4	0,18

Таблица П.2.5. Параметры АД с исправной ОР в режиме 2

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
100	59,8	58,3	59,7	0,24	0,24	0,23	4	3,6	4	0,28
90	53,7	54,3	54,3	0,21	0,21	0,21	3,2	3,6	3,6	0,32
80	48	48	48	0,19	0,19	0,19	3,2	3,2	3,2	0,35
70	42,4	42,4	42,4	0,17	0,17	0,17	2,8	2,8	2,8	0,4
60	36,4	36,4	36,4	0,15	0,15	0,15	2,8	2,8	2,8	0,5
50	31	31	31	0,14	0,14	0,14	2,4	2,8	2,4	0,65
45	27,5	27,5	27,5	0,13	0,13	0,13	2,4	2,8	2,4	0,75
40	24,6	25,1	24,9	0,12	0,13	0,12	2,4	2,4	2,4	0,85
35	21,5	22,3	22	0,12	0,13	0,13	2,4	2,4	2,4	0,9
30	18,4	19	18,5	0,14	0,14	0,14	2,4	2,4	2,4	1

Продолжение таблицы П.2.5.

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
25	15,7	16,6	16,3	0,15	0,16	0,16	2,4	2,4	2,4	1
380	219	220	220	1,26	1,27	1,29	45,6	52,4	50	0,18

Таблица П.2.6. Параметры АД с исправной ОР в режиме 3

U, В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _A , Вт	P _B , Вт	P _C , Вт	cosφ
100	59,1	58,7	59,4	0,35	0,35	0,35	15,2	15,6	16	0,77
110	64	64,2	67,7	0,34	0,34	0,34	15,2	16	16	0,72
120	70,7	70,6	71,2	0,34	0,35	0,35	15,6	16	16	0,65
130	75,7	75,8	76	0,35	0,35	0,36	16	16,4	16,4	0,6
140	81,5	82	82	0,36	0,37	0,37	16,4	16,8	16,4	0,56
150	88	87,6	88	0,38	0,38	0,38	16,8	17,2	17,2	0,51
160	92,5	92,8	93,5	0,4	0,4	0,4	17,2	18	17,2	0,48
170	98	98	99	0,42	0,42	0,42	17,6	18,8	18,4	0,45
200	116	116	117	0,48	0,49	0,49	19,6	21,6	20	0,3
380	220	220	220	1,25	1,25	1,25	52	63	57	0,2

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Акты внедрения по результатам работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)


А.В. Гусенков
« » 2020 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
Страхова Александра Станиславовича

Результаты кандидатской диссертационной работы Страхова Александра Станиславовича используются в ИГЭУ на кафедре «Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования» (ЭСПиДЭ) при проведении практических занятий для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) и направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры) при изучении дисциплин «Современные методы технической диагностики электрооборудования» и «Системы автоматизированного управления и диагностирования в электроэнергетике». Внедрены следующие результаты диссертационной работы Страхова А.С.:

- лабораторный стенд «Методы функционального контроля состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций»;
- методические указания к лабораторной работе «Методы функционального контроля состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций».

Декан электроэнергетического
факультета, к.т.н., доцент


А.Ю. Мурзин

Зам. заведующего кафедрой ЭСПиДЭ,
доцент кафедры ЭСПиДЭ, к.т.н.


И.Н. Сулыненков

УТВЕРЖДАЮ:

технический директор ИвТЭЦ-2
филиала «Владимирский» ПАО «Т Плюс»

_____ Гапеев Е.В.

«_____» _____ 2020 г.

**АКТ****внедрения результатов диссертационной работы
Страхова Александра Станиславовича**

Удостоверяем, что полученные Страховым А.С. в диссертационной работе теоретические и практические результаты используются в ходе проведения контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанции в режиме пуска.

Эффективность разработок Страхова А. С. определяется повышением экономичности и безотказности работы системы собственных нужд электростанции за счет уменьшения вероятности внезапных отказов высоковольтных асинхронных электродвигателей.

Начальник ЭЦ ИвТЭЦ-2

Мочалов С.Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Патенты на изобретения на основе проведенных исследований

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2687881

**СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБОРВАННЫХ СТЕРЖНЕЙ В
КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКЕ 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), Новоселов Евгений Михайлович (RU), Полкошников Денис Андреевич (RU), Корнилов Дмитрий Сергеевич (RU), Швецов Николай Константинович (RU), Скоробогатов Андрей Александрович (RU)*

Заявка № 2018121860

Приоритет изобретения 13 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 13 июня 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2724988

**СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБОРВАННЫХ СТЕРЖНЕЙ В
КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКЕ 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), Новоселов Евгений Михайлович (RU), Полкошников Денис Андреевич (RU), Назарычев Александр Николаевич (RU), Чумаков Никита Сергеевич (RU), Скоробогатов Андрей Александрович (RU)*

Заявка № 2019121731

Приоритет изобретения 09 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 29 июня 2020 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 июля 2039 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

