

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Королёв Николай Александрович



ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО
ЧАСТОТНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ СПЕКТРА ТОКА

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Козярук А.Е.

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	11
1.1 Структура и алгоритмы управления электроприводом	11
1.2 Анализ неисправностей устройств в составе асинхронного электропривода насосной установки	15
1.3 Современные методы диагностики неисправностей электротехнических комплексов с электроприводом.....	20
1.4 Подходы к оценке технического состояния электротехнических комплексов с электроприводом.....	25
1.5 Научно-технические проблемы контроля технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом...	29
1.6 Выводы по главе 1	30
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ АД И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЭП	32
2.1 Характерные частоты в спектре тока при дефектах асинхронного двигателя.....	32
2.2 Гармонический состав тока и напряжения АД при питании от АИН. 64	
2.3 Критерии энергоэффективности АЭП при неисправностях АД.....	66
2.4 Критерии работоспособности АЭП при неисправностях АД	72
2.5 Выводы по главе 2	77
ГЛАВА 3 ГРАНИЦЫ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АЭП	78
3.1 Границы работоспособности АЭП.....	78
3.2 Границы предельно-допустимого режима работы АЭП	83
3.3 Границы допустимого режима работы АЭП.....	91
3.4 Оптимальная область работоспособности АЭП.....	95
3.5 Выводы по главе 3	98
ГЛАВА 4 СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АЭП.....	100

4.1 Структура системы контроля технического состояния	100
4.2 Алгоритмы оценки технического состояния электропривода	101
4.3 Способы оценки технического состояния электропривода	107
4.4 Имитационное моделирование систем управления с интегрированной системой диагностики и оценки технического состояния	111
4.5 Описание лабораторного стенда и экспериментальных исследований алгоритмов оценки технического состояния	118
4.1 Выводы по главе 4	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А ГРАНИЦЫ АМПЛИТУДНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА	147
ПРИЛОЖЕНИЕ В ПРОГРАММНЫЙ КОД АЛГОРИТМОВ	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Г ПАТЕНТЫ И СВИДЕТЕЛЬСТВА	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Д СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одной из основных задач государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики», утвержденной на 2030 г., является модернизация, повышение надежности функционирования и переход электроэнергетики на новый технологический уровень. Переход к технологиям «Индустрии 4.0» реализуется в условиях роста потребителей электроэнергии, а также тенденции увеличения внедрения асинхронного электропривода в промышленности.

Электротехнические комплексы (ЭТК) с автоматизированным электроприводом являются сегодня ключевым звеном в технологическом цикле промышленного предприятия, определяющим количество, качество и себестоимость продукции. Широкое применение асинхронного двигателя (АД) в электроприводе обосновано его энергетическими, механическими и технико-экономическими показателями, при этом его доля применения на промышленных предприятиях составляет до 85% от всех электроприводов. Оптимальность энергетических и механических характеристик асинхронного электропривода достигается за счет различных алгоритмов систем управления в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями. Однако воздействия различных типов (тепловое, электрическое, механическое и др.), определяемые условиями эксплуатации, приводят к ускоренному износу с появлением дефектов, а также нарушению требуемых показателей регулирования, достигаемых при проектировании и пусконаладочных работах. Отсутствие унифицированных и нормированных методик оценки технического состояния, вида и уровня дефектов приводит к ускоренному износу отдельных узлов автоматизированного электропривода в целом, снижению механических и энергетических показателей с последующим аварийным отключением.

В связи с этим, вопросы разработки аппаратно-программных средств идентификации дефектов и оценки технического состояния

автоматизированного электропривода, обеспечения его энергоэффективности и работоспособности являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Изучению общих вопросов оптимального управления алгоритмами скалярного и векторного управления автоматизированного привода посвящены труды многих отечественных ученых: Виноградова А.Б., Шрейнера Р.Т., Браславского И.Я., Лезнова Б.С., Пронина М.В., Анучина А.С. и др. Саушевым А.В. описана область работоспособности электротехнических систем и обоснован метод определения запаса работоспособности с использованием электрических и механических аналогий. Петроченковым А.Б. описаны средства и методы повышения функционирования электротехнических комплексов (ЭТК). Работы Вейнберга К.Б, Thomson W.T. посвящены спектральному анализу тока АД при дефектах. Исследования Cardoso A.J. посвящены девиации формы годографа тока АД в зависимости от вида и уровня дефектов.

По производству и исследованиям средств контроля, диагностики, мониторинга, методов обработки сигналов следует выделить компании: National Instruments (США), Bruel&Kjaer (Дания), Schneider Electric (Франция), Ono-Sokki (Япония).

Российскими представителями в данной области научных и технических изысканий являются такие компании как: ИТЦ «Оргтехдиагноз» (г. Москва), ООО «Диамех» (г. Москва), АО «ВАСТ» (г. Санкт-Петербург), ООО «Интотес» (г. Нижний Новгород), ООО «Вибро-Центр» (г. Пермь).

Отечественный и зарубежный опыт показывают, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов в эффективности использования ЭТК. Однако, несмотря на многочисленные исследования, направленные на развитие общей теории технической диагностики и экспериментальных методик идентификации дефектов, алгоритмов управления, разработку аппаратно-программных комплексов поддержания работоспособности автоматизированного электропривода (АЭП),

отсутствуют унифицированные и нормированные методики оценки технического состояния АЭП с выявлением вида и уровня дефекта АД, что обуславливает необходимость их разработки.

Объект исследования

Электротехнические комплексы (ЭТК) предприятий с автоматизированным электроприводом и асинхронным двигателем со скалярной и векторной системами управления.

Предмет исследования

Оценка технического состояния автоматизированного электропривода по частотным составляющим спектра потребляемого тока асинхронного двигателя.

Цель работы

Разработка методики и программных средств оценки технического состояния автоматизированного электропривода при дефектах асинхронного двигателя с учетом критериев работоспособности и энергоэффективности.

Идея работы

Анализ частотных составляющих спектра потребляемого тока асинхронного двигателя может обеспечить идентификацию вида и уровня дефекта с непрерывной оценкой его технического состояния, а также определение энергетической и механической эффективности автоматизированного электропривода.

Основные задачи исследования:

1. Выбор и обоснование метода идентификации неисправностей асинхронного двигателя в автоматизированном электроприводе с возможностью оценки вида и уровня дефектов.

2. Исследование влияния вида и уровня дефектов на систему управления автоматизированного электропривода с различными алгоритмами управления в части энергетических и механических характеристик.

3. Разработка оценочных критериев технического состояния с выделением пороговых значений, учитывающих работоспособность и энергоэффективность автоматизированного электропривода.

4. Разработка структуры, алгоритмов и методики оценки технического состояния автоматизированного электропривода.

5. Численное и имитационное моделирование автоматизированного электропривода с интеграцией системы оценки технического состояния в систему управления электроприводом.

6. Экспериментальные исследования автоматизированного электропривода с системой оценки технического состояния при дефектах асинхронного двигателя.

Научная новизна работы:

1. Выявлены пороговые значения амплитуд гармонических составляющих в спектре потребляемого тока асинхронного двигателя, характеризующие вид и уровень дефектов автоматизированного электропривода со скалярными или векторными алгоритмами управления.

2. Найдены зависимости потребляемой активной мощности, частоты вращения ротора и электромагнитного момента от вида и уровня дефекта с формированием оценочных критериев.

3. Разработаны алгоритмы оценки технического состояния автоматизированного электропривода по амплитудным значениям гармоник в спектре потребляемого тока АД, отличающиеся идентификацией вида и уровня дефектов элементов узла, узла и устройства.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика по определению пороговых амплитудных значений гармонических составляющих в спектре тока, потребляемого асинхронным двигателем в составе автоматизированного электропривода, позволяющая идентифицировать вид и уровень дефекта.

2. Выделены и обоснованы критерии энергоэффективности и работоспособности автоматизированного электропривода относительно технического состояния.

3. Разработана методика оценки технического состояния автоматизированного электропривода по частотным составляющим тока асинхронного двигателя.

Методология и методы исследования

Результаты диссертационной работы были получены с использованием теории обобщенной электрической машины; теории электропривода; методов решения дифференциальных уравнений; методов численного и имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink; экспериментальных исследований.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы (технические науки) п. 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Пороговые значения амплитуд гармонических составляющих в спектре потребляемого тока асинхронного двигателя, характеризующие вид и уровень дефекта в автоматизированном электроприводе, определяются при учете уставок реализованных защит по току и напряжению, алгоритмов управления, а также требований к качеству и точности регулирования.

2. Амплитудные значения частотных составляющих спектра потребляемого тока асинхронного двигателя позволяют оценить техническое состояние автоматизированного электропривода на основе отклонений сигналов, дефектов элементов в узле, неисправностей узлов и устройств в его составе с оценкой критериев энергоэффективности и работоспособности.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена методами численного и имитационного моделирования, результатами экспериментальных исследований на лабораторном стенде, разработанном в Учебно-научном центре цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета, а также на испытательном стенде АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР», что подтверждено справкой о внедрении результатов.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1. Международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019» 24-25 апреля 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет;

2. Международная конференция «International Scientific Electric Power Conference «ISEPC-2019» 23-24 мая 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

3. Международная конференция «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering «EECE-2019» 19-20 ноября 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

4. 74-ая Международная молодежная конференция «Нефть и газ 2020», 28 сентября – 02 октября 2020 г., г. Москва, РГУ Нефти и газа им. Губкина И.М.

Личный вклад автора

В рамках исследования автором были сформулированы цели и задачи исследования, выполнен обзор зарубежной и отечественной научной литературы, проведен анализ существующих методов идентификации дефектов и оценки технического состояния, сформулированы и доказаны научные положения. Разработана методика определения пороговых значений частотных составляющих в спектре тока, потребляемого асинхронным

двигателем, позволяющие оценить техническое состояние автоматизированного электропривода с выявлением вида и уровня дефекта и оценкой энергоэффективности и работоспособности. Основные результаты диссертационной работы изложены в подготовленных научных публикациях и представлены на конференциях.

Публикации по результатам исследования

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 16 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 8 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Получены 6 патентов РФ, в том числе 3 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программного продукта для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Диссертация содержит 169 страниц машинописного текста, 87 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 120 наименований и 5 приложений.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Область применения АЭП представлена как различными отраслями промышленности, так и жилищно-коммунальным хозяйством и городской инфраструктурой. Широкое внедрение частотно-регулируемого АЭП обусловлено его технико-энергетическими и технико-экономическими показателями, развитием силовой электроники и микропроцессорной техники [31, 30]. При этом потенциал энергоэффективности и работоспособности высокодинамичных систем ЭП на базе высоковольтных электродвигателей (свыше 1000 В) большой и сверхбольшой мощности различных механизмов в большей степени реализован [62, 65]. Привод средней и малой мощности обладает потенциалом повышения энергоэффективности путем внедрения частотного регулирования (рисунок 1.1).

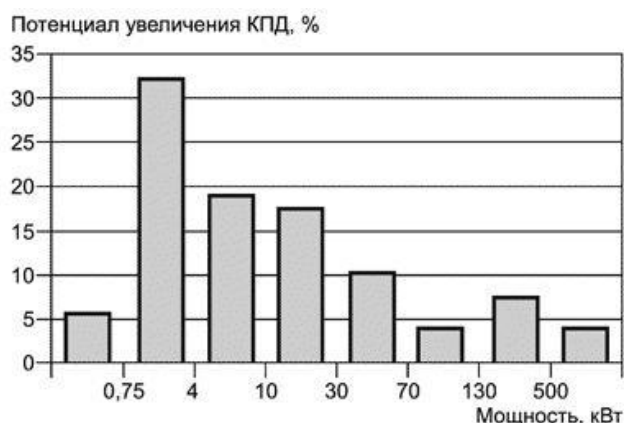


Рисунок 1.1 – Распределение потенциала увеличения КПД электродвигателей по мощностям с применением преобразователей частоты

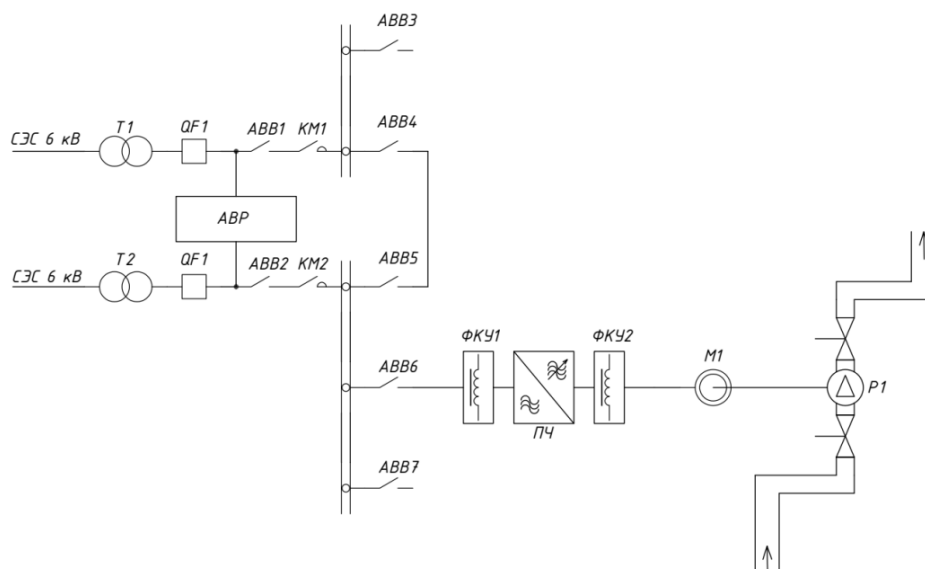
1.1 Структура и алгоритмы управления электроприводом

Реализация данного потенциала в области АЭП на примере насосных установок достигается путем применения полупроводниковых преобразователей частоты с различными алгоритмами управления. Достижение оптимумов по энергетическим и механическим характеристикам рассматривается согласно следующим структурам АЭП:

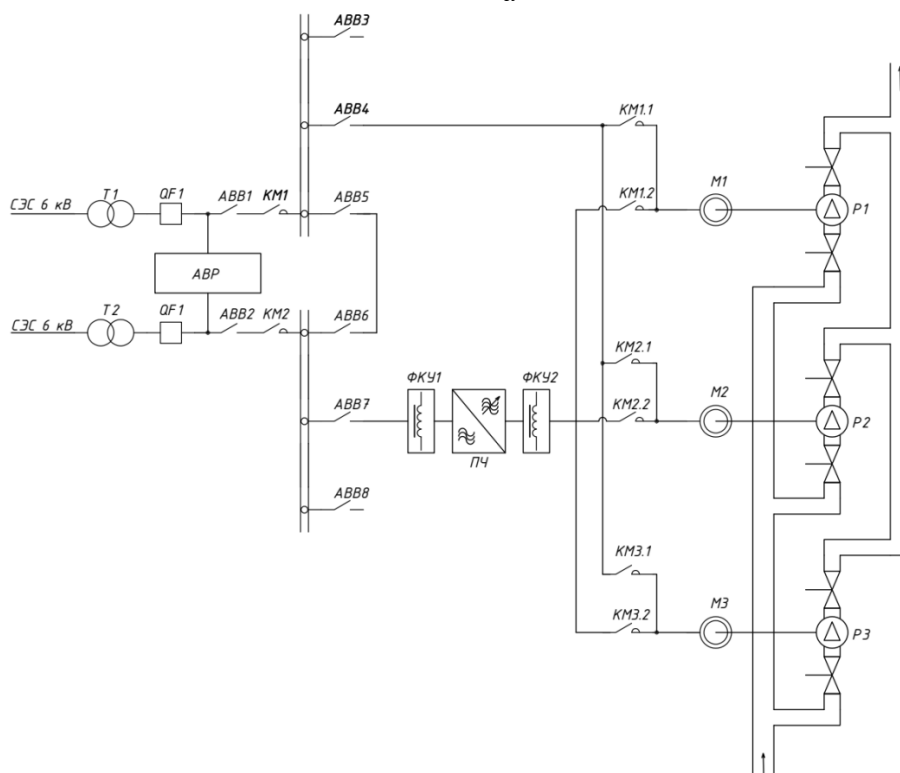
- **одновигательная** – управление одного электродвигателя осуществляется посредством частотного регулирования одним

преобразователем частоты (ПЧ) с реализацией как скалярных, так и векторных алгоритмов (рисунок 1.2 а);

- **многодвигательная** – регулирование осуществляется одним ПЧ с коммутацией между электродвигателями при достижении номинальной частоты вращения (рисунок 1.2 б).



а



б

Рисунок 1.2 – Одновдвигательная (а) и многодвигательная (б) структуры электропривода насосной установки: СЭС – система энергоснабжения; Т – силовой трансформатор; QF – вводной выключатель; ABB – автоматический вакуумный выключатель; ABP – автоматический ввод резерва; ФКУ – фильтры; М – асинхронный двигатель; Р – центробежный насос

При разработке и построении АЭП средней и малой мощности используют в 85% случаев двухзвенную структуру (рисунок 1.3), состоящую из неуправляемого выпрямителя (НВ) и двухуровневого автономного инвертора напряжения (АИН) для систем, не требующих высокой точности регулирования и быстродействия [44, 53].

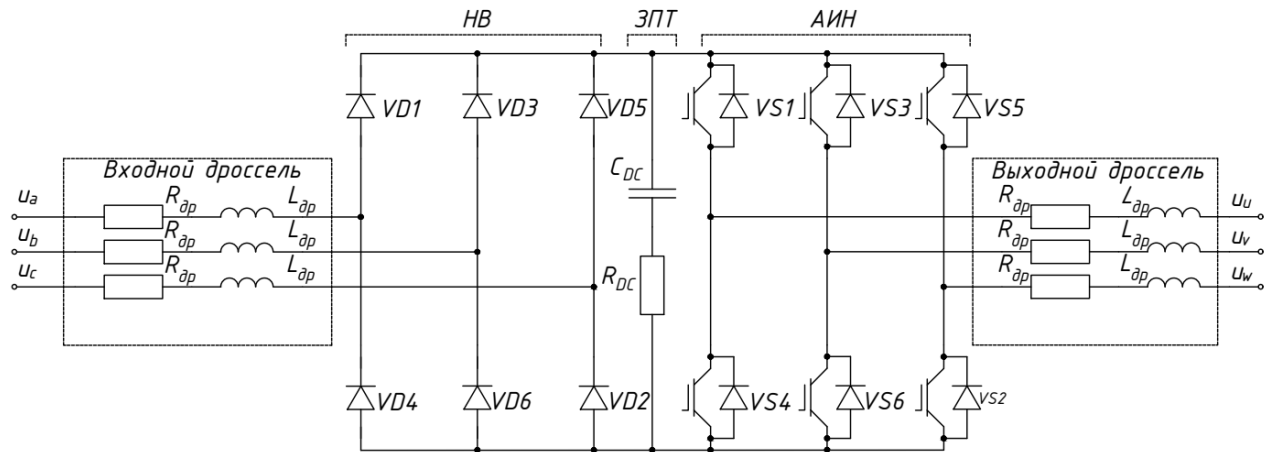


Рисунок 1.3 – Двухзвенная структура преобразователя частоты с НВ и АИН

При регулировании АД при помощи ПЧ с системами скалярного или векторного управления. При скалярной системе управления (ССУ) асинхронным электродвигателем регулирование скорости осуществляется посредством изменения частоты питающего напряжения с одновременным изменением его модуля [41]. Вариация частота напряжения влияет на пусковой и максимальный электромагнитные моменты, КПД и коэффициент мощности. Обеспечение механических характеристик электродвигателя при этом достигается за счет одновременного изменения частоты и амплитуду напряжения [66]. Реализация возможна при условии поддержания постоянства отношения и частоты напряжения статора в соответствии с одним из U/f-законов Костенко [65]. ССУ позволяет регулировать электродвигатель в диапазоне до 1:40, применяется для управления насосов, вентиляторов и других механизмов [53].

ССУ обладает следующими недостатками:

1. Замкнутая система управления по частоте вращения реализуется с физическим датчиком скорости;

2. Момент электродвигателя регулируется только косвенно;
3. Невозможно одновременно регулировать частоту вращения и электромагнитный момент.

При векторном управлении тока, потокосцепления и напряжения представляются в виде пространственных векторов. Такое управление обеспечивает независимое управление скоростью и моментом на валу [15, 28]. Осуществляется управление по текущим значениям переменных. Векторная система управления (ВСУ) позволяет обеспечить высокую точность регулирования, быстрое действие электропривода и обеспечивает управление вращающим моментом в относительно большом диапазоне. Электромагнитный момент при этом косвенно определяется током статора [13]. Для управления вектором тока статора необходимо непрерывно вычислять положение ротора, для чего требуется установка датчика положения ротора [52]. Стоимость электропривода с векторным управлением снижается при косвенном наблюдении скорости, но это требует высокой скорости вычислений от ПЧ и проведения больших объемов вычислений. Векторное управление обеспечивает диапазон регулирования 1:1000 при точности по моменту 1-5% и точности по скорости 0,01-0,5% [14]. Амплитуду и положение вектора потокосцепления ротора определяют путем разработки наблюдателя координат (математическая модель). При этом точность регулирования частоты вращения в ССУ составляет $\pm 2-3\%$, а в ВСУ без датчика скорости $\pm 0,2\%$ и $\pm 0,01\%$ с датчиком скорости [14]. В ВСУ реализованы алгоритмы обхода частот, оказывающих пагубное воздействие на двигатель, нелинейные темпы разгона и торможения, с обеспечением высокой точности позиционирования [29], что позволяет достичь высокого момента на низких частотах вращения [62], минимизировать потери в электродвигателе и снижает нагрузку системы энергоснабжения (СЭС). ВСУ позволяют строить прецизионные и высокодинамичные ЭП переменного тока, обеспечивающие наивысшую скорость и точность управления [13, 15].

Преимущества векторного управления:

1. Высокая точность регулирования частоты вращения и электромагнитного момента;
2. Независимое управление частотой вращения и электромагнитным моментом;
3. Диапазон и точность регулирования;
4. Быстродействие;
5. Снижение потерь на нагрев и намагничивание, повышение КПД.

Недостатки векторного управления:

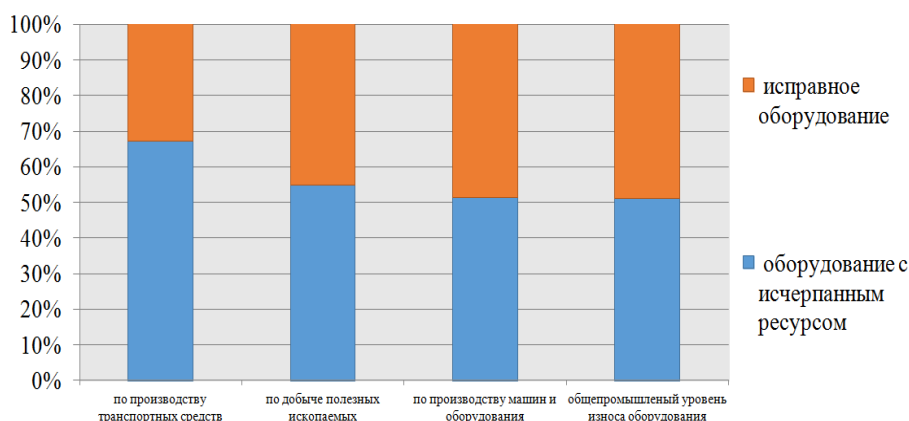
1. Необходимость задания точных параметров двигателя;
2. Вычислительная сложность в преобразователях и наблюдателях координат [29].

При реализации ССУ или ВСУ для качественной настройки коэффициентов регуляторов требуются уточненные параметры схемы замещения электродвигателя. Параметры зависят от температуры, насыщения стали, нагрузки и др., при этом в ходе эксплуатации ввиду механического износа, вибраций и длительных перегрузочных режимов происходит их изменение. Следовательно, снижается точность регулирования, а также показатели энергетической и механической эффективности. Перенастройка регуляторов возможна только при остановке ЭП в ручном режиме или в случае реализации в ПЧ функции автокалибровки (*Autotune*) параметров, осуществляемой перед каждым пуском в режиме холостого хода [50, 71].

1.2 Анализ неисправностей устройств в составе асинхронного электропривода насосной установки

Степень износа электромеханического оборудования по всем отраслям промышленности достигла 51,1%, в том числе на предприятиях по производству транспортных средств – 67%, по добыче полезных ископаемых – 54,9%, по производству машин и оборудования – 51,2%. Из всего парка техники полностью изношенными признаны 21,1% единиц

оборудования (рисунок 1.4 а), что обусловлено ненормированным режимом работы, на который рассчитан ЭП рисунок 1.4 б [27].



а



б

Рисунок 1.4 – Статистика технического состояния АД, а – износ по отраслям промышленности; б – фактическое время выхода из строя (количество АД $n=4142$)

При анализе неисправностей из структуры АЭП следует выделить основные функциональные устройства:

1. Преобразователь частоты (ПЧ);
2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД);
3. Исполнительный механизм (ИМ).

Нарушение работы полупроводниковых преобразователей частоты в процессе эксплуатации связано со следующими причинами.

Перегрузочные режимы связаны с превышением механической нагрузки на валу двигателя или выходного тока ПЧ, что приводит, в свою

очередь, к срабатыванию максимальной токовой, либо тепловой защиты двигателя [74, 75].

Несоответствующий уровень напряжения. Превышение допустимого уровня в звене постоянного тока (ЗПТ) вызвано тормозными режимами при переходе двигателя в генераторный режим. Низкий уровень напряжения обусловлен провалами напряжения в сети или нарушением целостности одной из фаз [42, 101].

Перегрев преобразователя частоты вызван нарушением работы силовых полупроводниковых приборов (диодов, IGBT транзисторов), а также системы охлаждения при загрязнении внутри корпуса [4, 17].

Имеются и другие неисправности в ПЧ, но в большей степени они связаны с настройкой и пусконаладочными работами, и обычно самодиагностируются внутренними модулями.

Нарушение работы АД вызвано воздействием как со стороны преобразователя частоты, так и со стороны механической части исполнительного механизма. Статистика наиболее распространенных неисправностей асинхронных электродвигателей (рисунок 1.5) показывает, что наиболее уязвимыми частями АД в рассматриваемом классе мощности являются обмотка статора и подшипники [27, 35, 38].

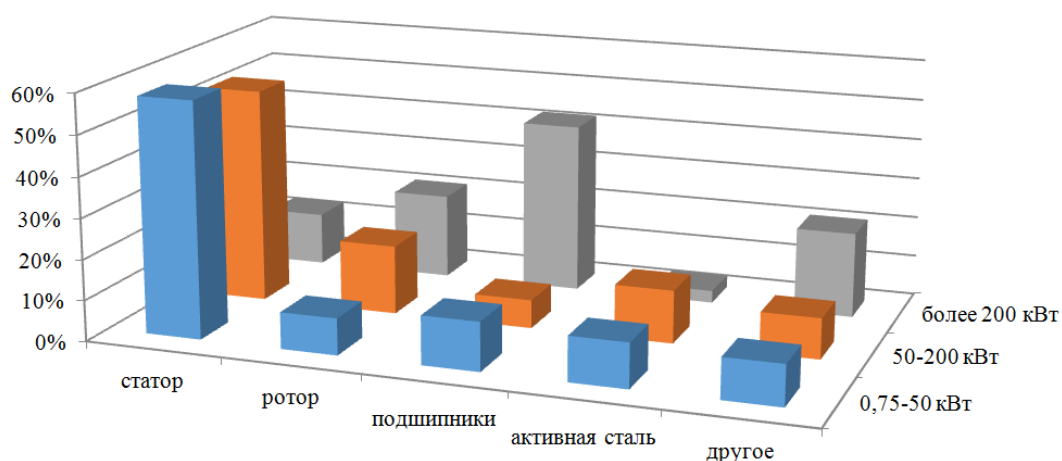


Рисунок 1.5 – Статистика причин выхода из работы АД

Повреждения обмоток статора происходят в большей степени из-за пробоя изоляции обмотки с последующим межвитковым замыканием под

воздействием различных факторов (электрической, тепловой и механической перегрузки, трения, вибрации и др), что сокращает электрическую прочность изоляции. Влияние этих факторов зависит от места установки, режима работы и конструктивных особенностей электродвигателей [16, 25, 33]. При питании от АИН по обмоткам статора АД протекают несинусоидальные токи и напряжения, увеличивая интенсивность старения изоляции. Высокие коммутационные перенапряжения, вызванные работой ПЧ, воздействуют на лобовые части обмотки статора, вызывая их деформацию и появление трещин в изоляции. Дефекты чаще всего образуются в местах выхода обмоток из пазов, где возникают наибольшие механические напряжения в изоляции при деформации лобовых частей [40]. В зависимости от эквивалентности одного из типов короткого замыкания определяется работоспособность всего ЭП.

Повреждения короткозамкнутых роторов вызваны ослаблением контакта (трещин) между стрежнями и короткозамкнутыми кольцами ротора ввиду вибраций электродвигателя с исполнительным механизмом и знакопеременных моментов на валу. Несвоевременное обнаружение приводит к дальнейшему росту вибраций, характерных для электрических вращающихся машин. В результате под действием центробежных сил происходит обрыв стержня с сопутствующим повреждением обмоток статора в лобовых частях.

Наличие данных дефектов в роторе АД влечет к увеличению активного сопротивления обмотки ротора, что меняет его механические и пусковые характеристики [78, 108].

Повреждение подшипников. Подшипниковая пара является важным узлом электродвигателя и больше подвержена износу из-за сил трения. Также на нее оказывает влияние работа всех устройств в ЭП. Основными причинами ускоренного износа подшипников являются:

- некачественная балансировка и центровка валов АД и ИМ;
- статический, динамический или смешанный эксцентриситет;

- износ соединительных муфт;
- повышенная вибрация и шум;
- загрязнение или недостаток смазочного материала.

Износ подшипника проявляется в его перегреве, в нарушении соосности валов электродвигателя и механической части, в появлении ударов или повышенной пульсации механического момента, в просадке скорости вращения и появление бросков потребляемых токов.

Повреждение активной стали статора является признаком ослабления или некачественной запрессовки шихтованной стали. Наличие микрозазора между листами пакета является причиной их деформации, сопутствующей росту вибраций и шуму. Вибрация листов активной стали вызывает трение с уложенными в пазах обмотками, что приводит к истиранию изоляционного лака, местному нагреву, замыканию или оплавлению активной стали. Характерной особенностью повреждения является наличие пыли в местах ослабления прессовки, обладающей магнитным свойством и оказывающей влияние на магнитные свойства пакета стали [77, 81, 109].

Причины возникновения дефектов следует разбить на категории:

1. конструкционные ошибки и производственный брак;
2. нарушения при монтажных и пусконаладочных работах;
3. ненормированные режимы эксплуатации (перегрузочные и аварийные режимы);
4. срок службы элементов;
5. влияние окружающей среды (пыль, влага, агрессивная среда и др.).

В связи с этим важным является вопрос определения вида и уровня неисправности для принятия опережающего управления с целью исключения аварийных остановок АЭП и нарушения технологического цикла.

1.3 Современные методы диагностики неисправностей электротехнических комплексов с электроприводом

Применимо к АЭП следует выделить следующие методы неразрушающего контроля.

Контроль изоляции. При эксплуатации изоляция электродвигателей подвергается тепловому, механическому, химическому, электромагнитному и др. воздействиям.

Электродвигатели малой мощности до 1000 В с продолжительным режимом работы подвергаются относительно небольшим механическим нагрузкам ввиду относительно слабого электрического и электромагнитного полей. Более опасным является тепловое воздействие на изоляцию, особенно для двигателей с частым реверсом и коммутационных перенапряжений при торможении и пусках. На срок службы изоляции оказывают и окружающая среда - температура воздуха, влажность, а также пыль и агрессивные газы. Это, главным образом, относится к изоляции, состоящей из волокнистых органических материалов, характеризующихся значительным влагопоглощением вследствие пористости. Проникновение влаги резко ухудшает диэлектрические свойства изоляции и вызывает необходимость ее сушки.

Контроль температуры. Основные способы и нормы контроля температуры обмоток приведены в ГОСТах [21, 22, 24]. Контроль температуры отдельных частей электродвигателя, на которые возможно установить термочувствительные измерительные средства (термометры, термопары, полупроводниковые терморезисторы и т.п.). При этом будет контролироваться тепловое состояние конкретного участка АД, а так как двигатель является многокомпонентной системой, то сложно выделить источник нагрева в виду высокой инерционности процесса.

Недостатком метода является автоматическое отключение машины от сети при достижении порогового значения температуры, нормированного производителем. Остановка нарушает технологический процесс работы

оборудования, но не позволяет корректно измерить температуру обмоток электродвигателей, работающих в режимах, отличных от S1.

Применение тепловизионной диагностики основано на том, что наличие практически всех видов дефектов оборудования вызывает изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного излучения, которое может быть зарегистрировано тепловизионными приборами (тепловизорами, термографами).

Тепловизионное изображение позволяет без соприкосновения с объектом получать полную информацию о распределении температуры по поверхности объекта, выявлять температурные аномалии, несущие информацию о внутренних процессах, предшествующих отказам техники или другим серьезным дефектам (рисунок 1.6).

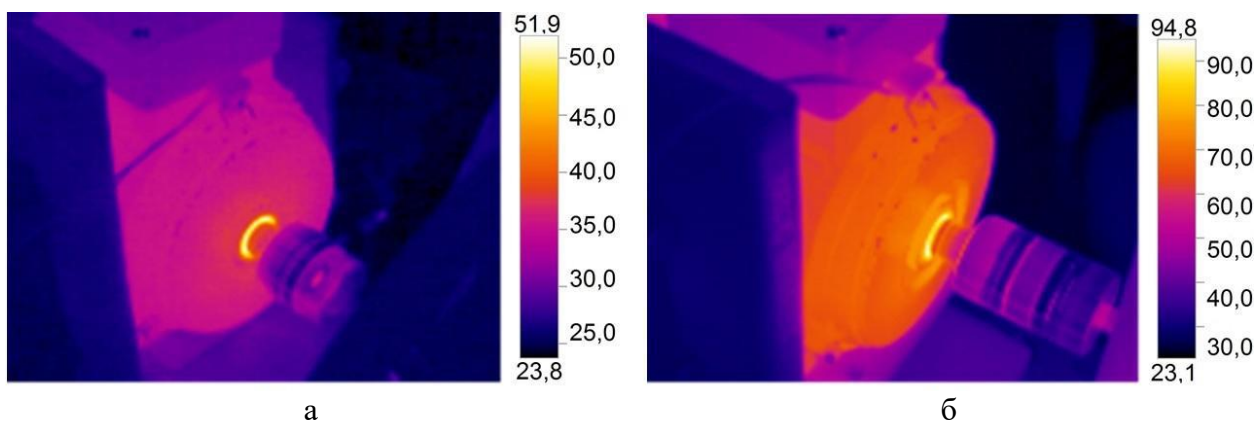


Рисунок 1.6 – Пример термограммы АД: а – с исправным подшипником; б – с неисправным подшипником

Основными недостатками методов контроля температуры является сложность идентификации причины дефектного состояния ввиду инерционности нагрева и сопряженности элементов электрической машины.

Применение датчиков температуры требует предварительной установки их в токоведущие части или дополнительно к каждому элементу и узлу электродвигателя. Методы направлены на диагностику электродвигателей, но не на силовые полупроводниковые ПЧ и исполнительные механизмы (ИМ).

Вибрационный контроль осуществляют для оценки технического состояния машины в процессе ее непрерывного длительного применения. В зависимости от вида машины и узлов, подлежащих контролю, измеряют один или несколько параметров вибрации с помощью соответствующих измерительных систем. В качестве первичных преобразователей (датчиков) для измерения вибраций [3, 24] применяют:

- пьезодатчики вибрации;
- акселерометры.

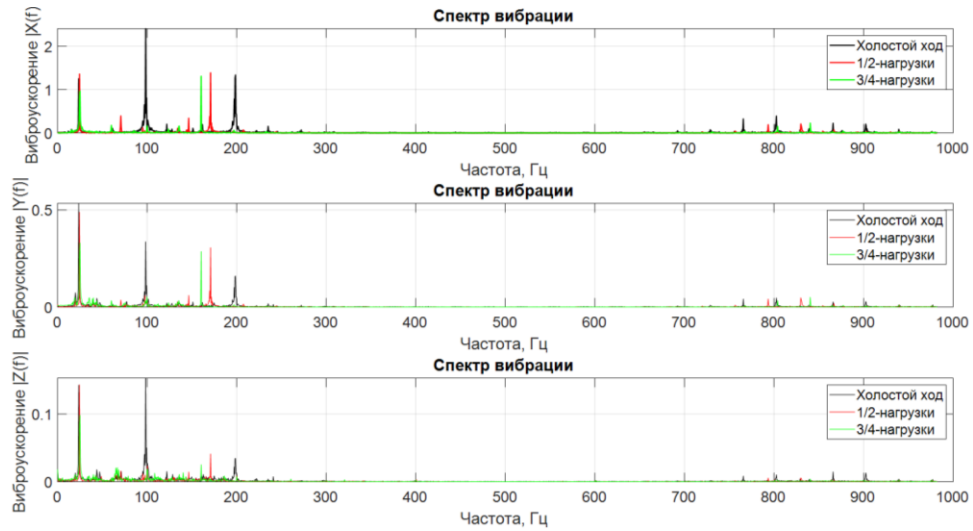
Для измерений требуется не менее 3-х датчиков, устанавливаемых в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях (рисунок 1.7 б).

Сигналы вибрации обладают информативностью о изменениях состояния как отдельных элементов, узлов вращающихся механических и электрических машин и установок. Также высокой информативностью, согласно [112] обладают составляющие сигналов виброперемещения, виброскорости, виброускорения и их следующие расчетные параметры [54, 55]:

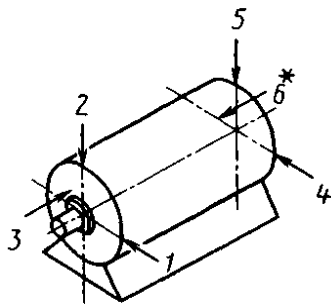
- амплитудные и среднеквадратические значения;
- спектры сигналов (рисунок 1.7 а);
- мощность и огибающая сигнала мощности;
- спектр мощности.

При относительно высокой информативности методики вибрационного контроля присутствует ряд недостатков. Первичные преобразователи требуют высокую точность к калибровке, причем со сроком эксплуатации точность измерений снижается. Необходим непосредственный доступ к приводу для установки на корпус, либо предусмотрена модификация корпуса для встроенных вибродатчиков. Первичные и расчетные данные, обладая высокой информативностью, не нормируются в соответствии с уровнем дефекта, за исключение среднеквадратической виброскорости (рисунок 1.7 в, г). При этом метод позволяет диагностировать неисправности в

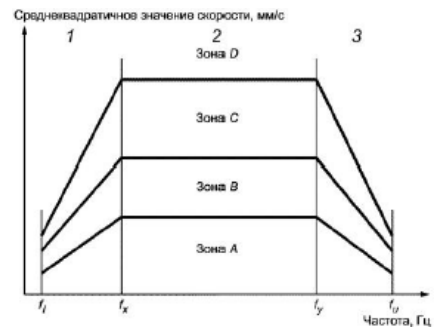
элементах и узлах электродвигателей и ИМ, а также оценивать влияние преобразователя частоты на акустические характеристики.



а



б



в

$v_{rms}, \text{ мм/с}$	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	C	B
4,5				
7,1	D	D	D	C
11,2				
18				
28				
45			D	D

г

Рисунок 1.7 – Вибрационный контроль: а – спектры 3-х осей виброускорения при изменении нагрузки; б – точки установки датчиков; в – нормы среднеквадратической виброскорости

Анализ электрических координат с целью диагностирования асинхронного двигателя строится на оценке мгновенных, амплитудных, среднеквадратических значений огибающих сигналов [11, 39], а также с применением спектрального и вейвлет анализа [86, 115]. В АД, как в электромеханической системе, нарушение узлов отражается комплексно в следующих координатах и параметрах:

- ток статора [72];
- потокосцепление ротора и статора [91, 107];
- электромагнитное поле [76];
- активная, реактивная мощность, коэффициент мощности [73].

Учитывая количество координат и методов обработки данных можно сделать вывод, что сигналы обладают потенциалом и информативностью. Однако существующие нормы и в большей степени экспериментальные методы диагностики не позволяют построить системы оценки технического состояния. В части первичных измерителей (датчиков) и совокупности диагностируемых параметров преимуществом обладает метод оценки потребляемого тока АД (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Связь дефектов и контролируемых параметров

Диагностируемый параметр	Виды дефектов асинхронного двигателя и параметры														
	Повреждение изоляции обмотки относительно корпуса	Повреждение межфазной изоляции	Межвитковое замыкание	Дефект обмотки статора	Короткое замыкание в обмотке статора	Дефект обмотки ротора	Повреждение подшипников	Повреждение ротора	Повреждение магнитопровода ротора	Повреждение магнитопровода статора	Динамический эксцентриситет	Статический эксцентриситет	Ассиметрия питающего напряжения	Несимметричность питающего напряжения	Дефект контактных соединений
Вибрация	-	-	-	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
Действующие значения тока	1	1	-	-	1	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-
Действующие значения напряжения	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-
Спектр тока	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-
Спектр напряжения	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	1	1	1	-
Коэффициент мощности	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	-	-	-	-
Величина потерь мощности	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	-	1	1	1

Продолжение таблицы 1.1.

Коэффициент гармоник (тока и мощности)	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-
Температурный, тепловизионный анализ	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Уровень электрической прочности изоляции	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-

Поиск частотных составляющих спектра потребляемого АД тока соответствующих дефектам определяет ГОСТ ISO 20958-2015 [22], при этом возможно идентифицировать фактическое наличие большого перечня дефектов, но оценить их уровень по амплитудным значениям достаточно сложно ввиду отсутствия методик и многофакторного воздействия на электродвигатель, что на сегодняшний день является нерешенной и актуальной задачей.

1.4 Подходы к оценке технического состояния электротехнических комплексов с электроприводом

Разработка оценочных средств технического состояния ЭТК требует методики поиска и оценки уровня дефектов, полноценно охватывающих объект контроля. На базе качественной оценки вида и градации уровней дефектов строится оценка технического состояния. Применимо к ЭТК реализуются следующие подходы:

Экспертный подход полностью построен на квалификации и опыте специалиста-диагноста, осуществляющего оценку технического состояния, подразделяется на:

- субъективный;
- объективный.

Субъективный подход предполагает визуальный осмотр электромеханического оборудования на предмет внешних проявлений дефектов (трещины, механические повреждения, места перегрева, сажа и др.) без остановки двигателя. Полный осмотр при полной остановке и дефектации оборудования.

Объективный подход реализуется на всех этапах идентификации состояния с применением контрольно-измерительного оборудования:

- мониторинг – непрерывная запись и обработка данных, регистрируемых датчиками, при эксплуатации оборудования;

- измерения при остановке оборудования без нарушения его целостности с применением дополнительных высокоточных переносных контрольно-измерительных приборов;

- дефектация – полная остановка и разбор оборудования для поиска элементов, являющихся причиной выхода из строя, их полная замена или ремонт.

Данный подход нормирован технологическими картами по ремонту и обслуживанию электромеханического оборудования ГОСТ 50938-2013, ГОСТ 18322-2016 [18, 23], но при этом подвержен человеческому фактору, что является одной из причин непредвиденных аварий.

Статистический (трендовый) подход заключается в периодической регистрации и обработке данных (амплитуда тока, уровень вибрации, среднее значение мощности и др.). За укрупненный период производится усреднение и строится линия тренда, определяющая скорость изменения контролируемого параметра (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Тренды контролируемого параметра

Данный подход достаточно эффективен в части применения в оценке технического состояния по первичным регистрируемым и расчетным данным

первого порядка и выше. Недостаток подхода связан с большим периодом усреднения, в который проявится дефект.

Модельный подход основан на разработке модели асинхронного двигателя и непрерывного сравнения с реальным объектом. Точность и сложность модели определяет эффективность реализации данного подхода. АД может включать следующие модели:

- математическая;
- иммитационная;
- физическая;
- электрическая;
- магнитная;
- тепловая;
- механическая.

Пример модельного анализа для АД описан в ГОСТ 20958-2015 [22]. Схема системы, реализующей модельный анализ, показана на рисунке 1.9. Ее работа состоит в измерении тока и напряжения в процессе работы двигателя и сопоставлении с математической моделью отношения между током и напряжением. Систему чаще используют в целях непрерывного контроля состояния двигателя, чем для кратковременных измерений в целях диагностирования, а ее выходы интегрируют в общую систему управления оборудованием предприятия. Это позволяет осуществлять автоматическую регистрацию трендов контролируемых параметров.

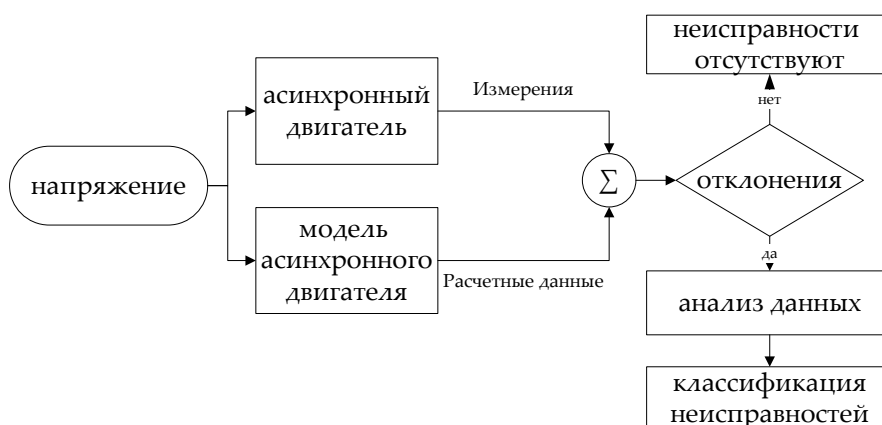


Рисунок 1.9 – Схема модельного анализа тока и напряжения

Выходными устройствами системы могут быть экраны контроля отдельных параметров; светофорные дисплеи, показывающие общее состояние оборудования вместе с результатами диагностирования, а также графики изменения контролируемых параметров со временем.

В алгоритме модельного анализа оценивается разность между измеренным и расчетным токами. Данная процедура существенно упрощает исследование именно тех составляющих, которые являются диагностическими признаками неисправностей. Поскольку алгоритм анализа основан на соотношении между напряжением и током, он хорошо подходит для приводных систем с изменяемой частотой выходного напряжения, в котором присутствуют значительные шумовые составляющие. В ходе обработки сигналов тока и напряжения шумовые составляющие взаимно удаляются, а остаются только те, которые обусловлены отклонениями в работе двигателя.

Главным преимуществом подхода является простота алгоритма, а также низкая стоимость оборудования, посредством которого он может быть реализован, обуславливая его применимость при контроле маломощных и недорогих электродвигателей. Сложность состоит в разработке математической модели двигателя и ее верификации.

Прогнозный подход реализуется поверх систем мониторинга с целью ожидания дефекта и его проявления. С переходом к «Индустрии 4.0» [26] прогнозные модели являются ключевым звеном в автоматизированном производстве. Построение прогнозных моделей заключается в поэтапной реализации следующих технологий:

- нейросетевые алгоритмы [83];
- алгоритмы машинного обучения [94, 99];
- большие базы данных (*Big data*) [100, 105];

Нейросетевые алгоритмы и алгоритмы машинного обучения позволяют достичь высокой точности обработки данных, а также способствуют выделению линейных закономерностей в нелинейных сигналах. Для

достижения высокой точности и достоверности требуются десятки итераций обучения и поднастройки нейронной сети, что в случае ЭТК с автоматизированным приводом сложно реализуемо ввиду многофакторного воздействия. Технология больших баз данных предполагает непрерывную запись неограниченного количества прямых и косвенных параметров ЭП, хранение и обработку. Реализация технологии подразумевает создание серверной части с большим объемом памяти, что требует больших капиталовложений.

Данные технологии с возможностью применения к электроприводам средней и малой мощности не имеют технико-экономического обоснования. Целесообразно их применение на предприятиях с большим парком приводов и классом мощности.

1.5 Научно-технические проблемы контроля технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом

В результате выполненного анализа систем управления электроприводами малой и средней мощности, применяемых насосных и вентиляторных установок в продолжительных режимах работы, а также причин незапланированного выхода из строя АД и, как следствие, всего технологического цикла по причине дефектов, выявлены основные причины ускоренного износа или аварийной остановки АЭП: связанные со следующими факторами:

- ненормируемые режимы работы АЭП (перегрузка, частый пуск и остановка ЭП, неверный подбор оборудования);
- некачественное изготовление АД, брак (прессовка шихтованной стали сердечника, некачественная изоляция и др.);
- условия эксплуатации (высокая влажность, агрессивная среда).

В большинстве случаев причиной несвоевременной остановки по причине износа или дефектов является отсутствие средств диагностики и мониторинга с заменой неисправного оборудования на новое с технико-

экономическим обоснованием такого подхода. Однако в обосновании не учитываются следующие факторы:

- повышенное энергопотребление до аварийной остановки;
- нарушение качества и точности регулирования ЭП;
- повышенный износ сопряженного механического оборудования;
- риски в травматизме персонала, недоотпуска продукции, в развитии масштаба аварийной ситуации.

Обоснование средств и методов оценки технического состояния АЭП связано со следующими научно-техническими проблемами:

- отсутствие унифицированных и нормированных методик идентификации дефектов АЭП по виду и уровню дефекта;
- отсутствие оценочных критериев для сложных многокомпонентных систем;
- учет изменения нагрузки при различных алгоритмах управления ЭП.

1.6 Выводы по главе 1

Целью диссертационной работы является разработка методики и средств оценки технического состояния автоматизированного электропривода при износе или дефектах асинхронного двигателя с учетом критериев работоспособности и энергоэффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить задачи:

1. Выбор и обоснование метода идентификации неисправностей асинхронного двигателя в автоматизированном электроприводе с возможностью оценки вида и уровня дефектов.

2. Исследование влияния вида и уровня дефектов на систему управления автоматизированного электропривода с различными алгоритмами управления в части энергетических и механических характеристик.

3. Разработка оценочных критериев технического состояния с выделением пороговых значений, учитывающих работоспособность и энергоэффективность автоматизированного электропривода.

4. Разработка структуры, алгоритмов и методики оценки технического состояния автоматизированного электропривода.

5. Численное и имитационное моделирование автоматизированного электропривода с интеграцией системы оценки технического состояния в систему управления электроприводом.

6. Экспериментальные исследования автоматизированного электропривода с системой оценки технического состояния при дефектах асинхронного двигателя.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ АД И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЭП

2.1 Характерные частоты в спектре тока при дефектах асинхронного двигателя

Из рассмотренных методов и способов идентификации неисправностей ЭТК, с учетом цели и задач, по информативности и перечню дефектов, которые можно выявить в ЭП, стоит выделить методы оценки вибраций [3, 21, 24] и токовой диагностики [11, 22, 81, 86, 108]. Применимо к АЭП метод токовой диагностики, в части анализа частотных составляющих в спектре, по сравнению с методом анализа вибрации обладает рядом преимуществ:

- не требует доступа к корпусу электродвигателя;
- не требует дополнительного монтажа датчиков на корпусе электродвигателя;
- датчики тока на эффекте Холла не подвержены росту ошибки измерений от продолжительности эксплуатации;
- обладает потенциалом определения большего количества дефектов как механической, так и электрической части АЭП.

Анализ статистических данных зарубежных и отечественных компаний [22, 108] по выходу из строя асинхронных двигателей по причине дефектов, описанных в п. 1.2., включающих неисправности i -ых узлов ($i = \overline{1, n}$; n – количество диагностируемых узлов):

- статор;
- ротор;
- воздушный зазор;
- подшипники.

Каждый из узлов электродвигателя состоит из нескольких элементов [16, 25, 33], одни из которых являются в сравнении с другими более уязвимыми.

Дефекты статора как ($i = 1$) узла состоят из нескольких j -ых элементов ($j = \overline{1, m}$; m – количество элементов в узле), основными неисправностями которых являются:

- асимметрия фазных токов;
- межвитковые замыкания в обмотке статора;
- однофазное и междуфазное короткие замыкания (КЗ).

Однофазное и междуфазное КЗ обладают высокой скоростью нарастания и предотвращаются действием тепловой или максимально токовой защиты. Асимметрия токов в фазных обмотках статора проявляется на частоте f_{d11} . Она вызвана неравномерным изменением общего сопротивления ввиду усталостного износа [106] и определяется по формуле (2.1). Также проявляется межвитковое эквивалентное замыкание в одной из фаз АД на частоте f_{d12} (2.2) с возникновением асимметрии в двух других фазах [70].

$$f_{d11} = f_1 \left(k \cdot z_2 \cdot \frac{1-s}{p} \pm n \right), \quad (2.1)$$

$$f_{d12} = f_1 \left(n \cdot \frac{1-s}{p} \cdot \pm r \right), \quad (2.2)$$

где f_1 – основная гармоника электрической сети 50 Гц;

s – скольжение, о.е.;

k – номер частотной составляющей в боковой полосе, $k = 1, 2, 3, \dots$;

z_2 – число пазов (стержней) ротора; p – число пар полюсов;

n – нечетное целое число, $n = 1, 3, 5, 7, \dots$;

r – нечетное целое число, $r = 1, 3, 5, 7, \dots$

Следовательно, в (2.1-2.2) частота проявления дефекта линейно связана с основной гармоникой f_1 и расчетным коэффициентом, определяющимся числовыми рядами ($k = 1, 2, 3, \dots$; $n = 1, 3, 5, 7, \dots$; $r = 1, 3, 5, 7, \dots$), выражается как k -ый коэффициент модуляции k_{mjk} (2.3-2.4). Коэффициент будет определять периодичность модуляции f_{dij} в сигнале с учетом, что $k = \overline{1, l}$; l – количество регистрируемых полос в спектре, которые возможно выделить относительно полосы шума $20 \lg(I_{d1j}/k_{m1k}) \leq -80$ Дб.

$$f_{d11} = f_1 \cdot k_{m1k}, \text{ при } f_{d11} \in k_{m1k}, k = \overline{1, l}, \quad (2.3)$$

$$f_{d12} = f_1 \cdot k_{m2k}, \text{ при } f_{d12} \in k_{m2k}, k = \overline{1, l}, \quad (2.4)$$

На данных частотах (2.3-2.4) при возникновении дефекта наводится амплитудная модуляция тока, создающая искажения в сигнале основной гармоники тока в виде гармонических сигналов (2.5-2.6):

$$i_{d11}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d11}}{k_{m1k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d11} \cdot t) \right], \quad (2.5)$$

$$i_{d12}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d12}}{k_{m2k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d12} \cdot t) \right], \quad (2.6)$$

где I_{d1j} – амплитудные значения тока, характерные дефектам в статоре, А;
 $k = \overline{1, l}$, l – определяется из условия $20 \lg(I_{d1j}/k_{mjk}) \leq -80$ Дб.

Гармонический состав тока, обусловленный неисправностями статора, определяется в соответствии с (2.5-2.6) как (2.7):

$$i_{d1j}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d1j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d1j} \cdot t) \right], \quad (2.7)$$

Дефекты ротора ($i = 2$) заключаются в обрыве стержней и наведенной в результате асимметрии. Ввиду механической связи ротора, помимо собственных дефектов, возможно выделить неисправности механических соединений и исполнительного органа.

Дефекты ротора:

- обрыв стержней ротора;
- ослабление соединительной муфты;
- асимметрия ротора.

Обрывы стержней ротора возникают при частых реверсах АД и знакопеременных составляющих электромагнитного момента, в результате чего стержни отходят от колец беличьей клетки [79], на частоте f_{d21} (2.8). Частотная составляющая f_{d22} биений на удвоенной частоте скольжения обусловлена нарушениями в механической части привода (муфта, редуктор, исполнительный орган) (2.9). Асимметрия короткозамкнутого ротора возникает при частичном нарушении стержней с неравномерным изменением активного сопротивления по окружности и длине ротора (2.10) [22, 59, 73].

$$f_{d21} = f_1(1 \pm 2 \cdot k \cdot s), \quad (2.8)$$

$$f_{d22} = \pm 2 \cdot s \cdot f_1, \quad (2.9)$$

$$f_{d23} = f_1 \cdot (n \cdot (1 - s) \pm s), \quad (2.10)$$

где f_1 – основная гармоника электрической сети 50 Гц;

s – скольжение, о.е.;

n – нечетное целое число, $n = 1, 3, 5, 7, \dots$;

k – номер частотной составляющей в боковой полосе, $k = 1, 2, 3, \dots$

Аналогично (2.3-2.4) для (2.8-2.10) расчетный коэффициент представим в виде k -го коэффициента модуляции $k_{mj k}$, тогда гармонический состав токов дефектов ротора определяется по (2.11-2.13):

$$i_{d21}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d21}}{k_{m1k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d21} \cdot t) \right], \quad (2.11)$$

$$i_{d22}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d22}}{k_{m2k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d22} \cdot t) \right], \quad (2.12)$$

$$i_{d23}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d23}}{k_{m3k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d23} \cdot t) \right], \quad (2.13)$$

где I_{d2j} – амплитудные значения тока, характерные дефектам в роторе, А;

$k = \overline{1, l}$, l – определяется из условия $20 \lg(I_{d2j}/k_{mj k}) \leq -80$ Дб.

Гармонический состав тока, обусловленный неисправностями ротора, определяется в соответствии с (2.11-2.13) как (2.14):

$$i_{d2j}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d2j}}{k_{mj k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d2j} \cdot t) \right] \quad (2.14)$$

Эксцентриситет воздушного зазора ($i = 3$) возникает в результате смещения центра вращения ротора АД относительно геометрического. В зависимости от параллельного [104] или углового [88] смещения эксцентриситет подразделяется на:

- статический эксцентриситет;
- динамический эксцентриситет;
- комбинированный эксцентриситет.

Динамический эксцентриситет определяется как (2.15), а при порядке динамического эксцентриситета $n_d = 0$ эксцентриситет считается статическим и выражается как (2.16) и из-за несовершенства конструкции изначально присутствует в АД.

$$f_{d31} = f_1 \left[(k \cdot R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm v \right], \quad (2.15)$$

$$f_{d32} = f_1 [k \cdot R \frac{1-s}{p} \pm v], \quad (2.16)$$

где f_1 – основная гармоника электрической сети 50 Гц;

n_d – порядок динамического эксцентриситета $n_d = 1, 2, 3, \dots$;

p – число пар полюсов;

R – количество пазов ротора; s – скольжение, о.е.;

v – порядок временных гармоник статора, $v = 1, 3, 5, 7, \dots$;

k – номер частотной составляющей в боковой полосе, $k=1, 2, 3, \dots$

$$i_{d31}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d31}}{k_{m1k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d31} \cdot t) \right], \quad (2.17)$$

$$i_{d32}(t) = \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d32}}{k_{m2k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d32} \cdot t) \right], \quad (2.18)$$

где I_{d3j} – амплитудные значения тока, характерные статическому и динамическому эксцентриситету, А;

$k = \overline{1, l}$, l – определяется из условия $20 \lg(I_{d3j}/k_{mjk}) \leq -80$ Дб.

Гармонический состав тока, обусловленный эксцентриситетом воздушного зазора, с учетом (2.17-2.18) примет вид (2.19):

$$i_{d3j}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d3j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d3j} \cdot t) \right]. \quad (2.19)$$

Подшипники ($i = 4$) в АД ввиду механического контакта и сил трения подвержены износу, а их нарушение приводит к возникновению других дефектов (эксцентриситета, асимметрии ротора и статора и др.). Подшипник состоит из трех основных деталей: тел качения (в работе рассматриваются шарики), внутреннего и внешнего колец [87, 93, 110,]. Дефекты этих элементов обладают повышенной скоростью развития, что приводит к быстрой деградации механической части электродвигателя, и определяются как (2.20-2.22):

- тела качения;
- внутренняя дорожка;
- внешняя дорожка.

$$f_{d41} = \frac{n_{ш}}{2} \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{ш}}{D_{оц}} \cdot \cos\beta \right)^2 \right], \quad (2.20)$$

$$f_{d42} = \frac{n_{ш}}{2} \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[1 + \frac{D_{ш}}{D_{оц}} \cdot \cos\beta \right], \quad (2.21)$$

$$f_{d43} = \frac{n_{ш}}{2} \cdot f_1 \cdot s \cdot [1 - \frac{D_{ш}}{D_{оц}} \cdot \cos\beta], \quad (2.22)$$

где f_1 – основная гармоника электрической сети 50 Гц;

s – скольжение, о.е.;

$n_{ш}$ – число шариков в подшипнике; β – угол контакта шариков, градусы;

$D_{оц}$ – диаметр окружности центров шариков, мм;

$D_{ш}$ – диаметр тел качения, мм.

Аналогично (2.3-2.4) для (2.20-2.22) расчетный коэффициент представим в виде k -го коэффициента модуляции k_{mjk} , тогда гармонический состав тока, вызванный дефектами подшипников, определяется как (2.23-2.25):

$$i_{d41}(t) = \sum_{k=1}^l [\frac{I_{d41}}{k_{m1k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d41} \cdot t)], \quad (2.23)$$

$$i_{d42}(t) = \sum_{k=1}^l [\frac{I_{d42}}{k_{m2k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d42} \cdot t)], \quad (2.24)$$

$$i_{d43}(t) = \sum_{k=1}^l [\frac{I_{d43}}{k_{m3k}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d43} \cdot t)], \quad (2.25)$$

где I_{d4j} – амплитудные значения тока, характерные дефекту в подшипнике, А;

$k = \overline{1, l}$, l – определяется из условия $20lg(I_{d4j}/k_{mjk}) \leq -80$ Дб.

Гармонический состав тока, обусловленный неисправностями статора, определяется в соответствии с (2.23-2.25) как (2.26):

$$i_{d4j}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l [\frac{I_{d4j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{d4j} \cdot t)]. \quad (2.26)$$

Согласно (2.7, 2.14, 2.19, 2.24) гармонический состав тока, вызванный дефектами АД, определяется (2.27):

$$i_{dij}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l [\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{dij} \cdot t)]. \quad (2.27)$$

При питании АД от сети синусоидального напряжения промышленной частоты 50 Гц (2.28) мгновенное значение тока статора определяется согласно (2.29):

$$u_c(t) = U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) = U_1 \cdot \sin \omega_1 t, \quad (2.28)$$

$$i_1(t) = I_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t + \varphi) = I_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (2.29)$$

где U_1, I_1 – амплитудные значения основных гармоник фазных напряжения и тока, А;

f_1 – частота основных гармоник тока и напряжения, Гц, (50 Гц);

ω_1 – частота вращения основных гармоник тока и напряжения, рад/с;

φ – угол сдвига между основной гармоникой фазного тока и напряжения, рад.

С учетом (2.27) и (2.29) мгновенное значение тока статора примет вид (2.30). Наличие дефектов определяет гармонический состав, который вносит искажение к основной гармонике тока, что проявляется в спектре потребляемого тока (рисунок 2.1). Гармонические составляющие, искажая форму тока, искажают и результирующее электромагнитное поле, что отражается при незначительных дефектах в форме обобщенного вектора тока [32, 92] (рисунок 2.2).

$$i_{ст}(t) = i_1(t) + i_{dij}(t) = \\ = I_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{dij} \cdot t) \right] \quad (2.30)$$

Для идентификации частотных составляющих в спектре потребляемого тока в качестве объекта исследований используем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, подключаемый согласно упрощенной схеме (рисунок 2.3). Использовались АД серии АИР132М общепромышленного назначения с паспортными данными (таблица 2.1), параметрами Т-образной схемы замещения (таблица 2.2) с радиальными шарикоподшипниками серии 6208, имеющими следующие геометрические размеры (рисунок 2.3 и таблица 2.3). АД имеет механическую жесткую связь с нагрузочным двигателем, формирующим момент сопротивления на валу. В качестве первичных преобразователей для измерений тока и напряжения применялись датчики на эффекте Холла [80] с последующим преобразованием сигналов в дискретный вид при помощи высокочастотного АЦП. Запись регистрируемых данных осуществляется в файл с устанавливаемой периодичностью, минимальной длиной 30 с и частотой дискретизации сигнала не менее 4 кГц.

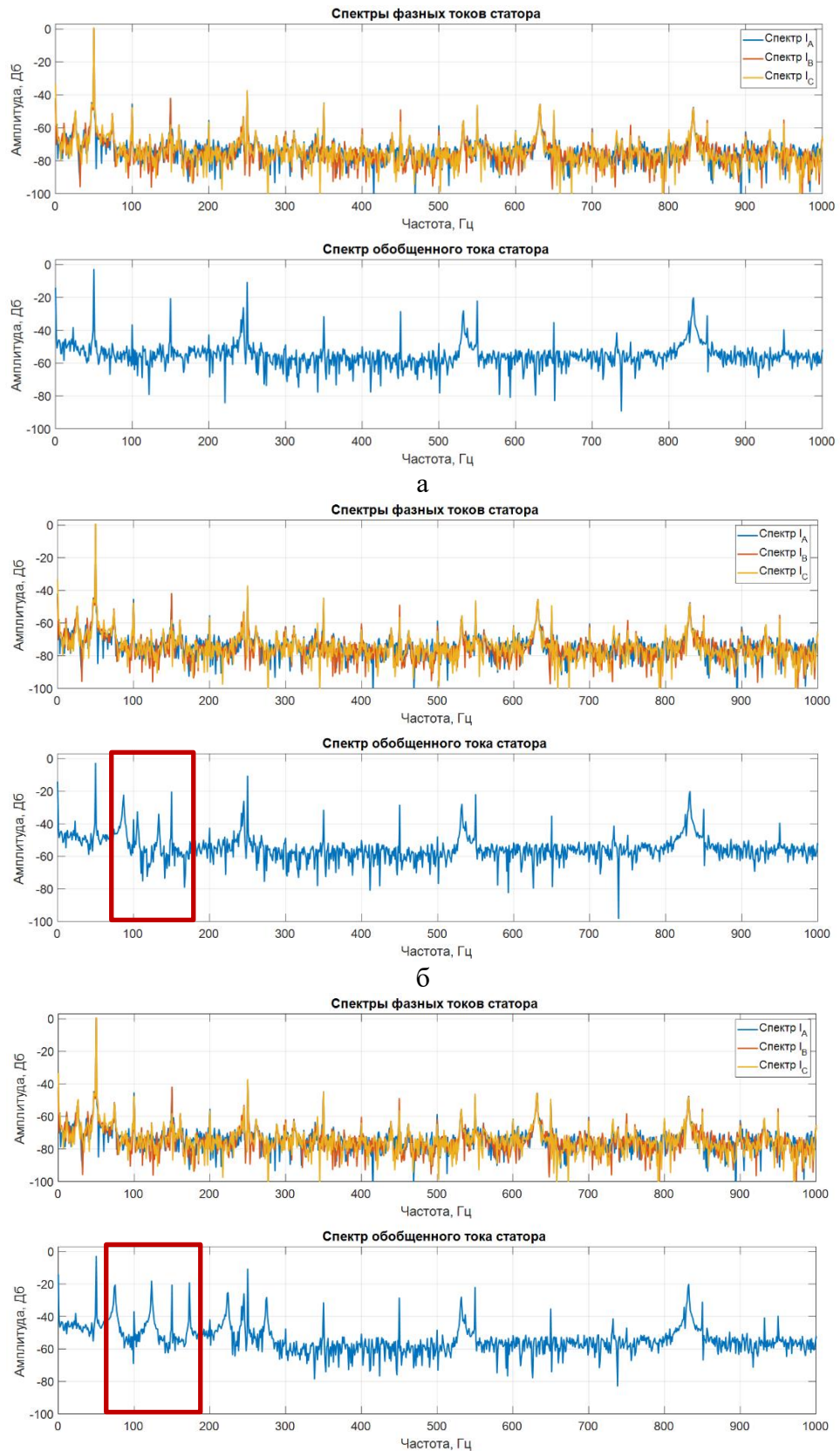


Рисунок 2.1 – Спектры фазных и обобщенного тока АД: а – в исправном состоянии; б – при дефекте подшипника; в – при межвитковом замыкании в фазе А

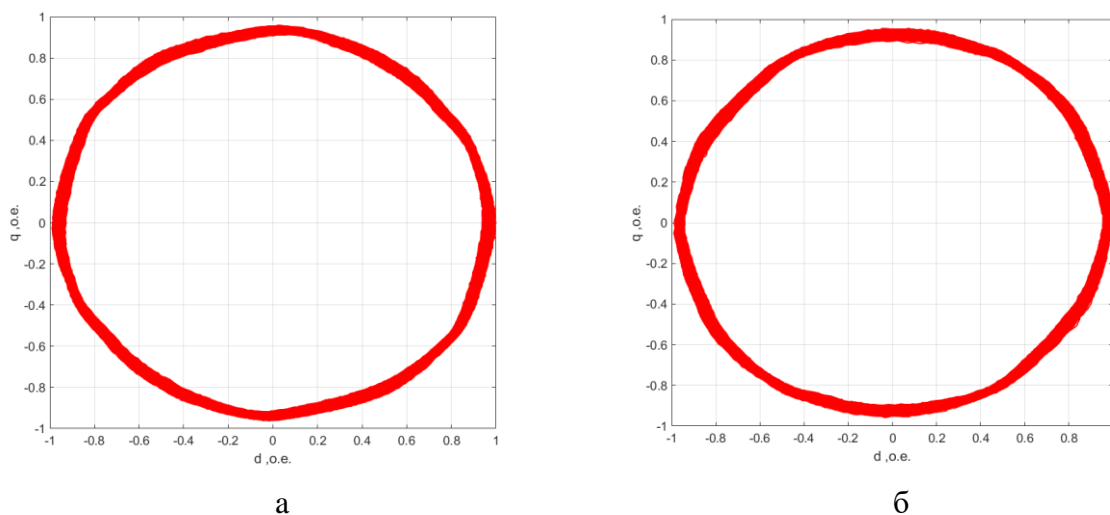
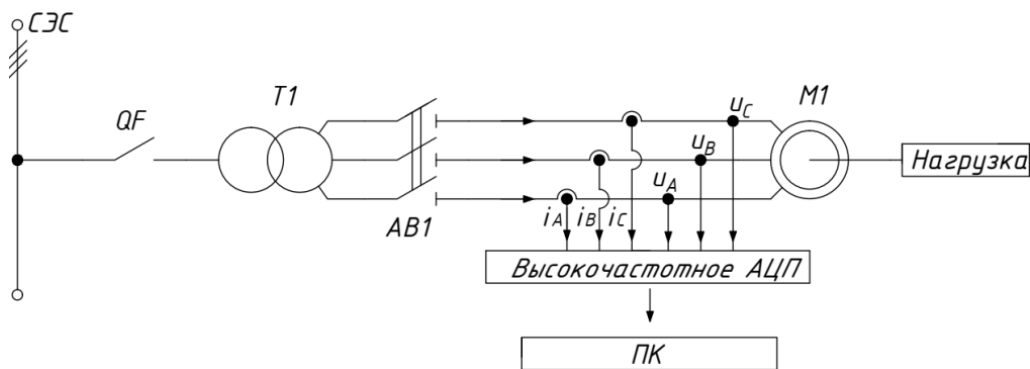


Рисунок 2.2 – Вектор обобщенного тока АД: а – в исправном состоянии; б – при начальной стадии дефекта.



а



б

Рисунок 2.3 – Испытуемый АД: а – испытательный стенд; б – упрощенная схема подключения: *CЭС* – система энергоснабжения; *QF* – вводной выключатель *AB1* – автоматический выключатель; *T1* – трансформатор; *АЦП* – аналогово-цифровой преобразователь; *M1* – асинхронный двигатель; *ПК* – персональный компьютер

Таблица 2.1 – Паспортные данные двигателей АИР132М4

Напряжение $U_{ном}, В$	Мощность $P_{ном}, кВт$	Ток, $I_{ном}, А$	n об/мин	$\cos\varphi$	КПД, %	λ	K_p	K_i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
380	11.00	23.40	1450	0.82	87.1	2.3	2.2	6.8

Примечание: λ – перегрузочная способность, о.е.; K_p – кратность пускового момента, о.е.; K_i – кратность пускового тока, о.е.

Таблица 2.2 – Параметры схемы замещения двигателей

Усл. обозн	Наименование	L_s , Гн	L_r , Гн	L_m , Гн	R_s , Ом	R_r , Ом
1	2	3	4	5	6	7
АД №1	АИР132М4	0.1453	0.1473	0.1400	0.5212	0.3051
АД №2		0.1455	0.1474	0.1401	0.5214	0.3053
АД №3		0.1456	0.1475	0.1402	0.5216	0.3055

Примечание: L_s – индуктивность намагничивания статора, Гн; L_r – индуктивность намагничивания ротора, Гн; L_m – взаимная индуктивность намагничивания, Гн; R_s – активное сопротивление статора, Ом; R_r – активное сопротивление ротора, Ом.



Рисунок 2.4 – Шариковые подшипники серии 6208: а – общий вид; б – эскиз типоразмеров изделия

Таблица 2.3 – Технические характеристики подшипника серии 6208

Подшипник	d , мм	D , мм	B , мм	d_1 , мм	D_2 , мм	r_1, r_2 , мм	$n_{ш}$	$D_{ш}$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6208	40	80	18	52.6	69.8	min. 1.1	9	12,7

Примечание: d - диаметр отверстия, мм; D - наружный диаметр, мм; B - ширина, мм; d_1 - диаметр внутреннего кольца, мм; D_2 - диаметр наружного кольца, мм; r_1, r_2 - размер фаски наружного кольца, мм.

При наличии шумов в сигналах тока и напряжения требуется фильтрация для исключения паразитных частотных составляющих в спектрах. Оптимальная фильтрация низкочастотной части гармонических сигналов тока и напряжения достигается применением фильтра Батерворта [69] не менее 4-го порядка и 2 кГц частоты среза с точностью 0,2%, что отображено на осциллограммах (рисунок 2.5). Предварительно необходимо выполнить нормировку сигналов тока и напряжения относительно номинальных величин $I/I_{ном}$ и $U/U_{ном}$, а также преобразование амплитуды в логарифмический масштаб $A(f_{dij}) = 20lg(I_{dij})$. При этом общая частота дискретизации $f_d = 10000$ Гц с разрешающей способностью $\Delta f = 0,017$ Гц.

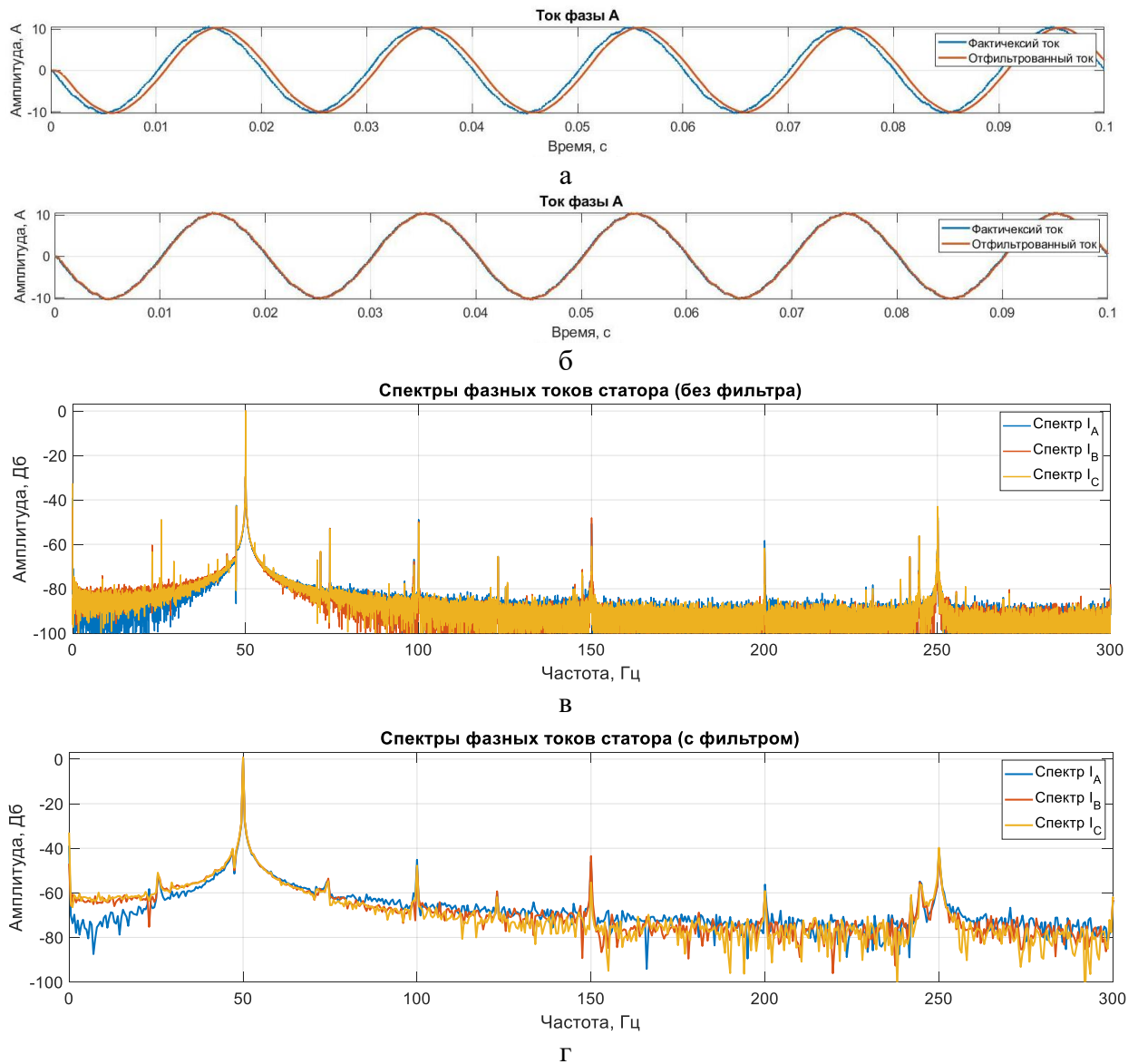


Рисунок 2.5 – Фильтрация сигнала: а – сигнал 3-х фазного тока без настройки фильтра; б - сигнал 3-х фазного тока с оптимальным фильтром; в – спектр зашумленного сигнала фазного тока; г - спектр отфильтрованного сигнала фазного тока

С целью имитации межвитковых замыканий в двигателях (АД №1, АД №2, АД №3) в одной из фаз обмотки статора изготовлены отпайки с n количеством витков ($w_{кз}=3, 7, 14, 28$). За счет шунта с сопротивлением от 0,82 до 4,05 Ом витки закорачивались с установленным током короткого замыкания $I_{кз} = 6 \div 40$ А (максимальное значение тока КЗ ограничено уставкой по току автоматического выключателя).

В начале для исправного двигателя регистрировались эталонные значения фазных токов АД. После чего с помощью коммутатора производилось замыкание на шунт n -витков обмотки статора, которое

обеспечивало значения тока КЗ $I_{кз}$, соответствующее межвиткового замыкания с глубиной короткого замыкания $K_{кз}$ (2.30).

$$K_{кз} = \frac{w_{кз} \cdot I_{кз}}{w_{об} \cdot I_{ном}} \cdot 100\%, \quad (2.30)$$

где $w_{об}$ – паспортное количество витков в фазе статора;

$w_{кз}$ – количество короткозамкнутых витков в фазе статора;

$I_{ном}$ – номинальный ток АД, А;

$I_{кз}$ – эквивалентный ток КЗ, А.

Для анализа гармонических составляющих при межвитковом замыкании диапазон поиска частот определили согласно (2.1-2.2) $f_{d11} = 70 \div 250$ Гц (таблица 2.4), а эталонный спектр тока зарегистрировали при номинальной нагрузке и в режиме холостого хода (рисунок 2.7 а, б).

При создании эквивалентного межвиткового КЗ в фазе А, наблюдаются искажения в форме тока фаз (рисунок 2.6), обусловленные генерацией гармонической составляющей короткозамкнутого витка, при этом из-за нарушения симметрии АД, как 3-х фазного симметричного потребителя с активно-индуктивной нагрузкой, в других фазах наводятся искажения на более высоких частотах.

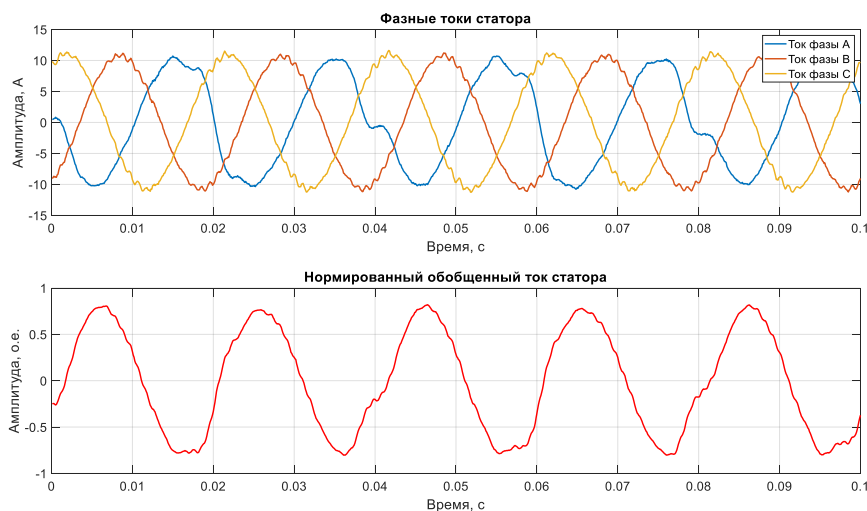


Рисунок 2.6 – Обобщенный и фазные токи АД при межвитковом замыкании в фазе А

Суммарное воздействие неисправностей в обмотке статора отражается в форме обобщённого тока (рисунок 2.6), определяющегося согласно (2.31).

$$\overline{i_{ст}}(t) = 2/3 \cdot [i_A(t) + i_B(t) \cdot \bar{a} + i_C(t) \cdot \bar{a}^2], \quad (2.31)$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения фазных токов, (А);

\bar{a} – оператор поворота фазных токов (120, 240 градусов).

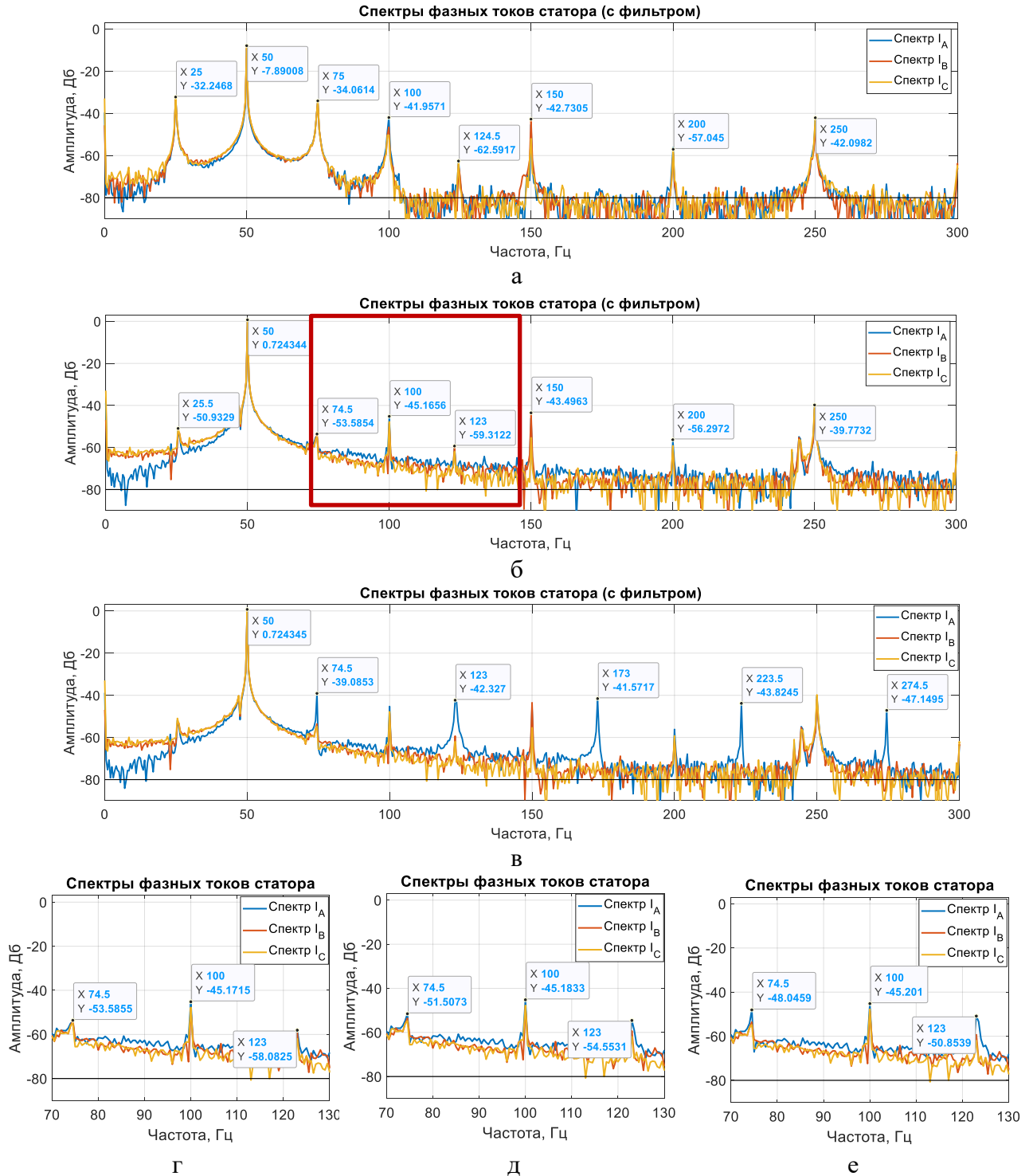


Рисунок 2.7 – Спектры фазных токов АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД при номинальной нагрузке; в – критическое значение КЗ в фазе А; г – АД с 6% КЗ в фазе А; д – АД с 12% КЗ в фазе А; е – АД с 24% КЗ в фазе А

Испытания в режиме холостого хода и номинальной нагрузке двигателя позволяют, выделить спектральные составляющие, вызванные конструктивным исполнением АД и кратные основной гармонике питающего

напряжения $f_d=50$ Гц (рисунок 2.7 а, б), с дальнейшим исключением их из анализа.

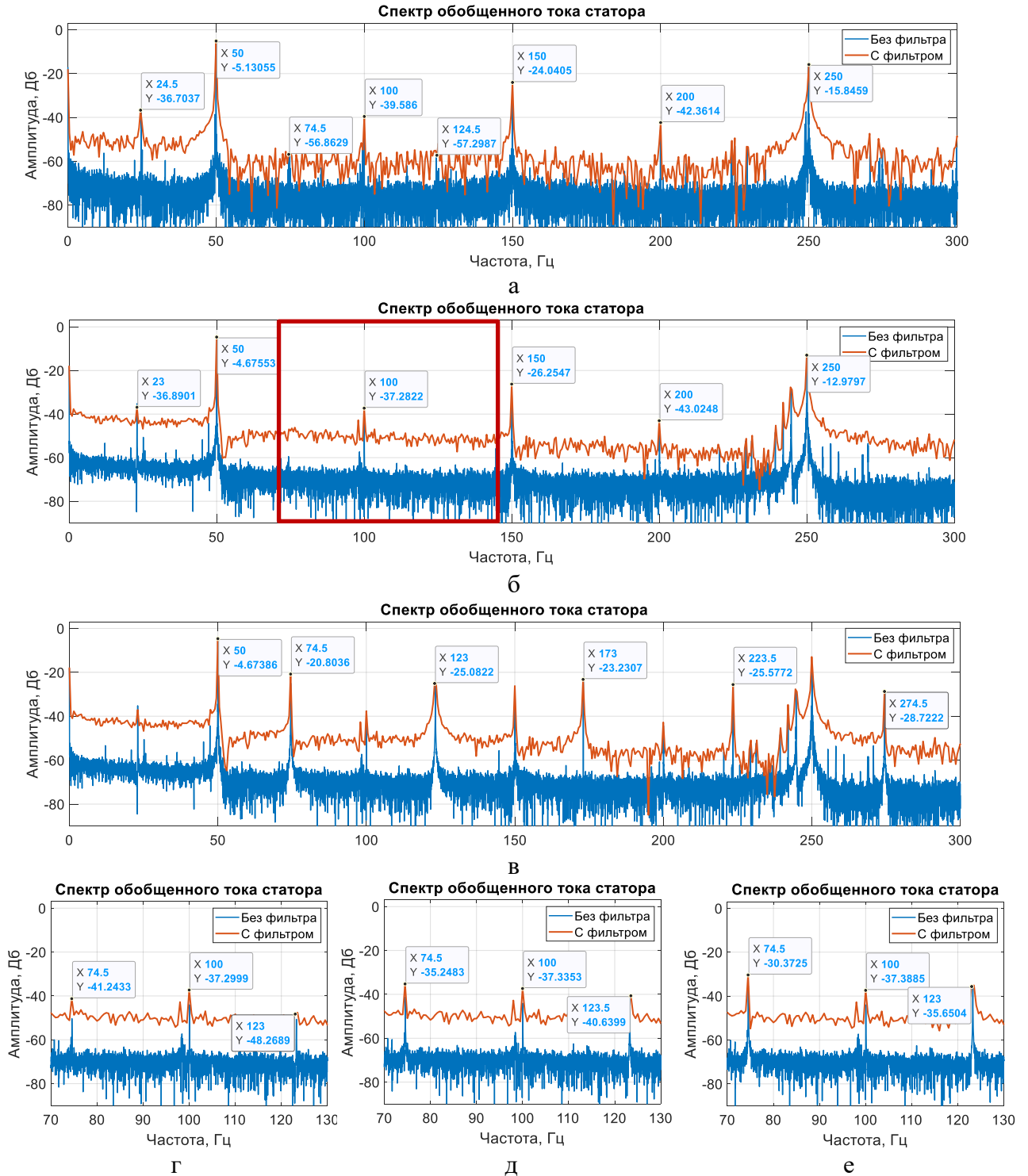


Рисунок 2.8 – Спектры обобщенного тока АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД при номинальной нагрузке; в – критическое значение КЗ в фазе А; г – АД с 6% КЗ в фазе А; д – АД с 12% КЗ в фазе А; е – АД с 24% КЗ в фазе А

С момента проявления и увеличения процентного значения межвиткового КЗ наблюдается относительный рост характерных частотных составляющих (рисунок 2.7 г, д, е).

Результаты проведенных испытаний ряда электродвигателей и анализа спектральных составляющих как фазных, так и обобщенного токов статора при синусоидальном напряжении питания и постоянной нагрузке сведены в таблицу 2.4. Неоднократное повторение измерений позволило выделить усредненные значения частот проявления f_{d11} и экспоненциальный рост амплитуды $A(f_d)$ при увеличении глубины КЗ, а также полосу отклонения частоты от расчетной $f_{d11} \pm \Delta f_d$.

Таблица 2.4 – Амплитуды частот спектра тока от глубины короткого замыкания

$K_{кз}$ %	k_{m1k}	Расчетная f_{d11} , Гц	АД №1		АД №2		АД №3		Усредненные	
			f_{d11} , Гц	$A(f_{d11})?$ Дб	f_{d11} , Гц	$A(f_{d11})?$ Дб	f_{d11} , Гц	$A(f_{d11})?$ Дб	f_{d11} , Гц	$A(f_{d11})$, Дб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	1	74,5	74,4	-60	74	-59,2	73,8	-58,2	74	-59,1
	2	123,5	123,2	-65	122,6	-64,8	123,6	-65,1	123,1	-65
	3	172,5	173	-67,7	172,3	-66,2	173,3	-66,3	172,9	-66,7
	4	174,5	173	-67,7	174,6	-67,1	175,1	-65,1	174,2	-66,6
	5	223,5	223	-70,5	223	-71	224,2	-70,8	223,4	-70,8
	6	274,5	274,5	-76,5	274	-76,5	274,3	-77,3	274,3	-76,8
12	1	74,5	74,4	-60,6	74	-58,2	73,8	-58,2	74,1	-59
	2	123,5	123,2	-56,9	122,6	-56	123,6	-56	123,1	-56,3
	3	172,5	173	-57,9	172,3	-56,9	173,3	-56,9	172,9	-57,2
	4	174,5	173	-57,9	174,6	-58,2	175,1	-58,2	174,2	-58,1
	5	223,5	223	-60,4	223,7	-61,2	224,2	-61,2	223,6	-60,9
	6	274,5	274,5	-67,4	274	-67,4	274,3	-67,4	274,2	-67,4
24	1	74,5	74,4	-53	74	-53,2	73,8	-53	74,1	-53,1
	2	123,5	123,2	-50,8	122,6	-51	123,6	-50,8	123,1	-50,9
	3	172,5	173	-51,5	172,3	-52,7	173,3	-51,5	172,8	-51,9
	4	174,5	173	-51,5	174,6	-51,7	175,1	-51,5	174,2	-51,6
	5	223,5	223	-54,3	223	-55,1	224,2	-54,3	223,4	-54,6
	6	274,5	274,5	-61,5	274	-60,3	274,3	-61,5	274,3	-61,1

Величина амплитуд боковых спектральных составляющих диагностических частот увеличивается пропорционально росту глубины короткого замыкания $K_{кз}$ ($K_{кз} = 0 \div 24$ % ограничен уставкой автоматического выключателя, шаг соответствует одному витку $w_{об}$). При этом, чем больше число витков обмотки подвергается короткому замыканию, тем при меньших токах КЗ и, следовательно, на более ранней стадии развития обнаруживается дефект.

Изменение активного сопротивления одной из фаз двигателя при различных воздействиях (тепловое, электрическое, электромагнитное и др.), а также разного рода КЗ приводит к изменению токов всех фаз и появлению

искажения в фазе без изменения сопротивления за счет неравномерности результирующего магнитного поля (рисунок 2.9).

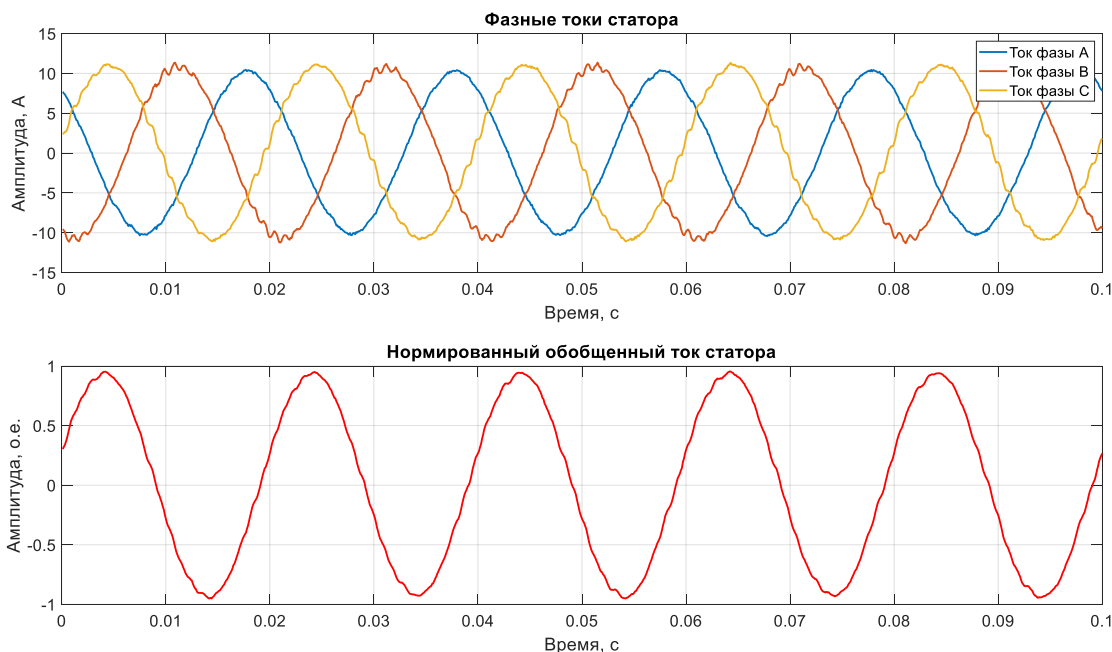


Рисунок 2.9 – Фазные токи АД при асимметрии статора

Согласно расчетным частотам (2.2), диапазон проявления асимметрии статора для данного типа двигателей определяется полосой частот $f_{d12} = 900 \div 1200$ Гц (таблица 2.5).

Анализ спектров фазных токов при изменении асимметрии сопротивления обмоток статора, путем добавочных сопротивлений в виде реостатов, отображает линейное увеличение амплитуд $A(f_{d12})$ в области 1 кГц и его боковых составляющих (рисунок 2.10). Подобное критическое воздействие проявляется при обрыве одной из фаз с формированием пульсирующего магнитного поля, а также соразмерность частотных амплитуд характерных частот с основной гармоникой питающей сети.

В исследуемой полосе частот при анализе спектра обобщенного тока статора исправного АД проявляются лишь частоты, кратные основной гармонике, а рост асимметрии, аналогично спектрам фазных токов, приводит к увеличению амплитуд характерных частот, но с меньшей интенсивностью (рисунок 2.11).

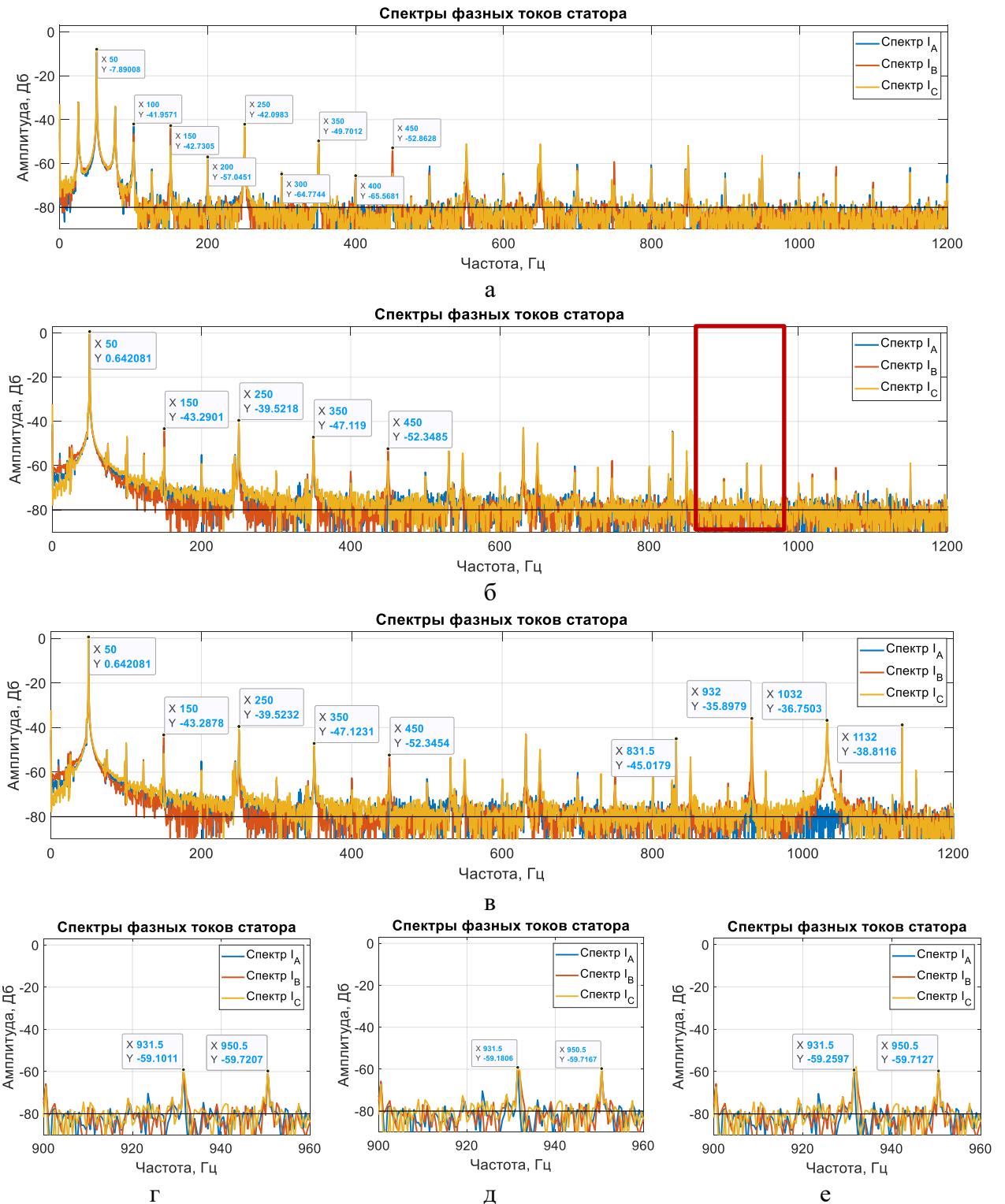


Рисунок 2.10 – Спектры фазных токов АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД при номинальной нагрузке; в – критический уровень асимметрии статора; г – 5% асимметрии статора; д – 10% асимметрии статора; е – 15% асимметрии статора

Результаты спектрального анализа потребляемых фазных и обобщенного токов АД при асимметрии статора сведены в таблицу 2.5.

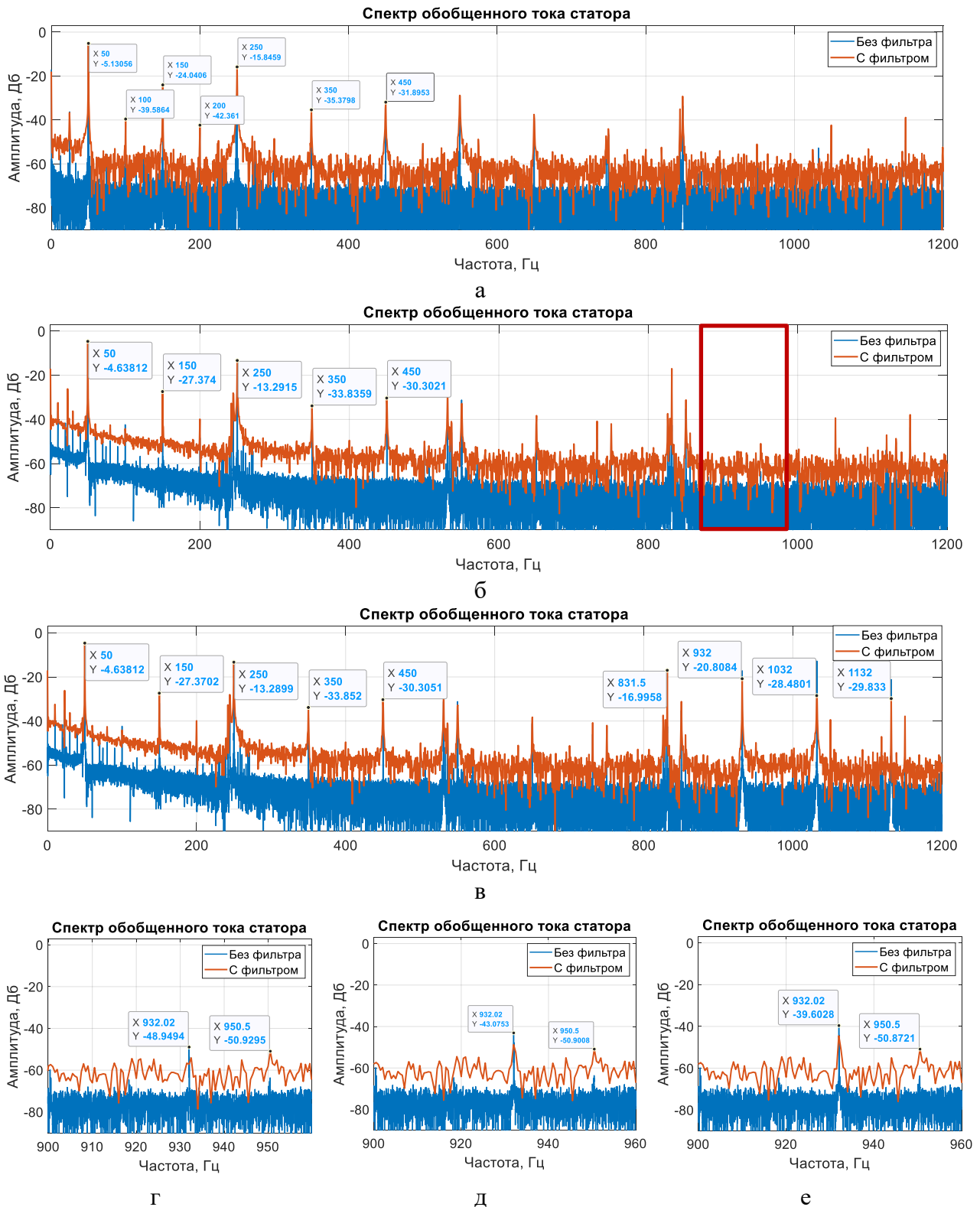


Рисунок 2.11 – Спектры обобщенного тока АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД при номинальной нагрузке; в – критический уровень асимметрии статора; г – 5% асимметрии статора; д – 10% асимметрии статора; е – 15% асимметрии статора

Выделены усредненные значения частот проявления f_{d12} и амплитуды $A(f_d)$ проявления дефекта при синусоидальности питающего напряжения и постоянстве нагрузки, а также наблюдается линейный характер зависимости.

Таблица 2.5 – Амплитуды частот спектра тока при асимметрии статора

N %	k_{m2k}	Расч. f_{d12} , Гц	АД №1		АД №2		АД №3		Усредненные	
			f_{d12} Гц	$A(f_{d12})$ Дб	f_{d12} Гц	$A(f_{d12})$ Дб	f_{d12} Гц	$A(f_{d12})$ Дб	f_{d12} Гц	$A(f_{d12})$ Дб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	1	932	931,5	-65,3	934	-66	933,2	-63,8	932,9	-65
	2	1032	1032,4	-68,5	1034	-68,5	1033,4	-68,3	1033,3	-68,4
	3	1132	1132,0	-70,4	1134	-70,4	1133	-70,4	1133,0	-70,4
10	1	932	932,1	-62,5	934	-62,5	933,2	-62,5	933,1	-62,5
	2	1032	1032,2	-62,1	1034	-62,1	1033,4	-62,1	1033,2	-62,1
	3	1132	1132,2	-64,6	1134	-64,6	1133	-64,6	1133,0	-64,6
15	1	932	932,0	-49,3	934	-49,8	933,2	-48,5	933,1	-49,2
	2	1032	1032,2	-49,3	1034	-51,3	1033,4	-49,5	1033,2	-50
	3	1132	1132,0	-49,2	1134	-52	1133	-49,2	1133,0	-50,1

Примечание: N – процент асимметрии токов статора

При обрыве стержней ротора в фазных токах наблюдается периодическая пульсация амплитудных значений по фазам (рисунок 2.12).

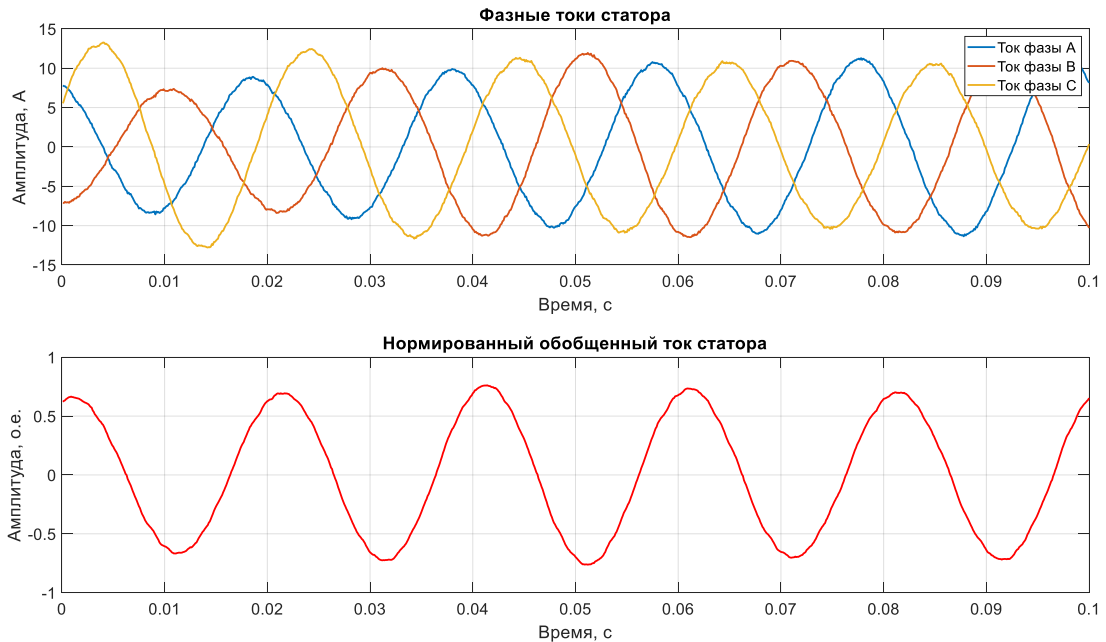


Рисунок 2.12 – Фазные токи АД при обрыве стержней ротора

Проявление дефекта обрыва стержней ротора состоит в появлении симметричных гармонических составляющих в области основной гармоники в диапазоне $f_d = f_1 \pm 25$ Гц согласно расчетным формулам (2.8-2.10).

Ранняя стадия проявления дефекта выявляется при режиме холостого хода (рисунок 2.13 а), а постепенное увеличение количества оборванных стержней приводит к росту амплитудных значений характерных частот и появлению у каждой частоты собственных симметричных боковых полос (рисунок 2.13).

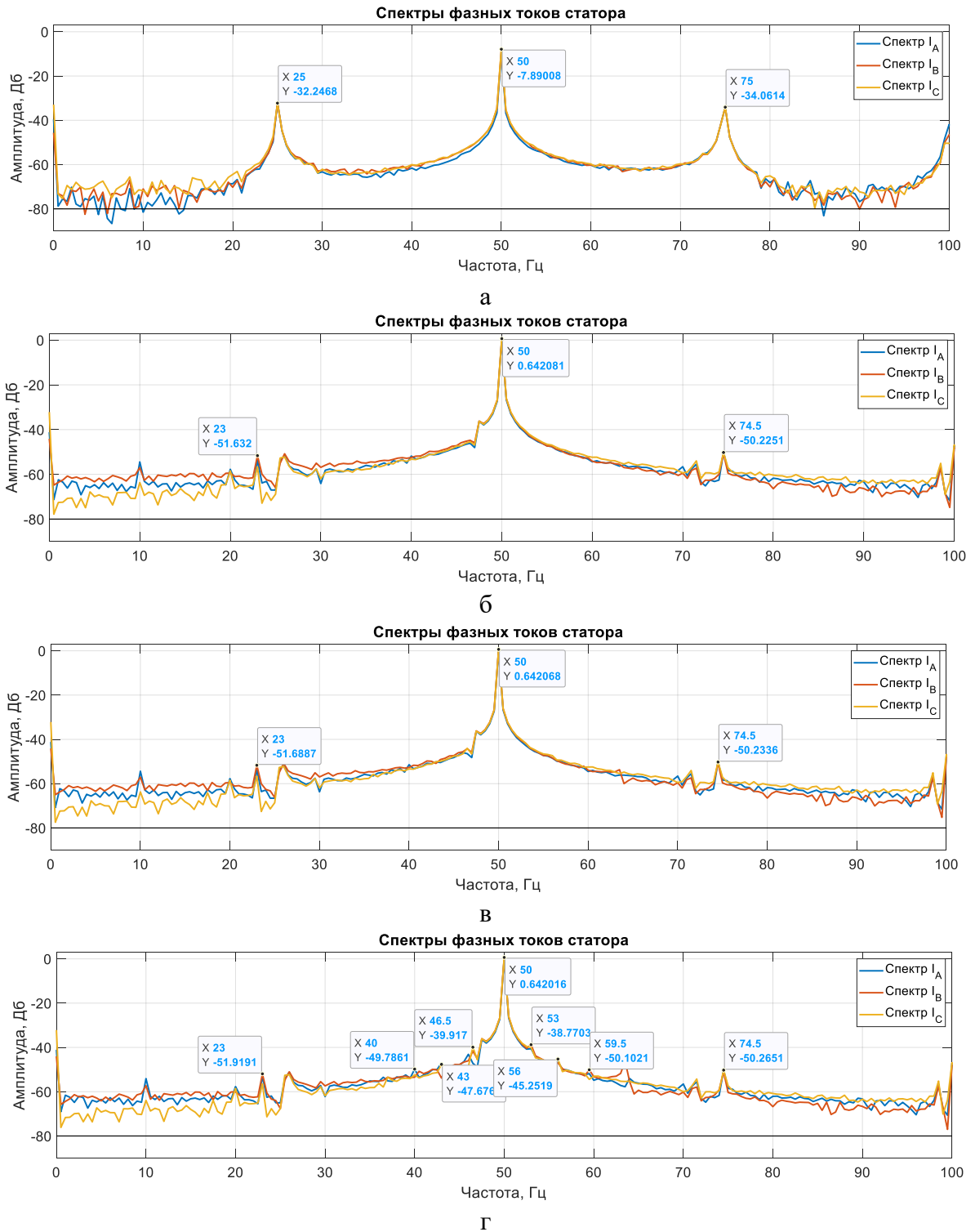
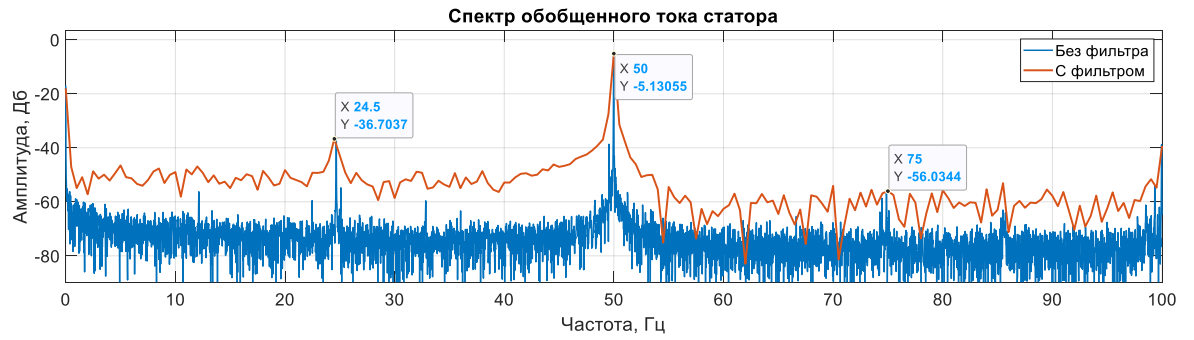
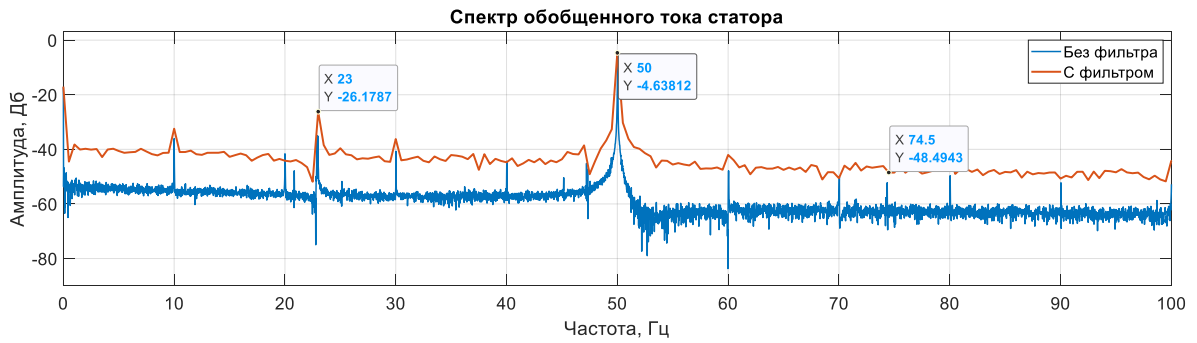


Рисунок 2.13 – Спектры фазных токов АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б - исправный АД при номинальной нагрузке; в – обрыв 1 стержня; г – обрыв 2 стержней

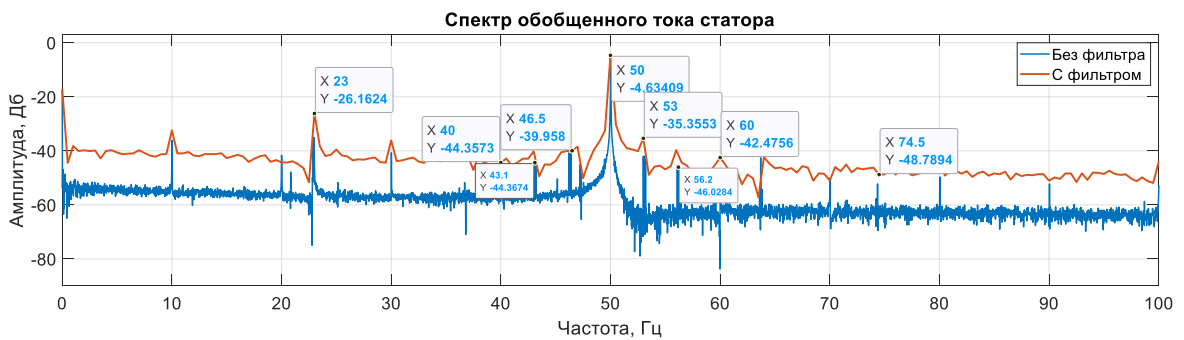
Анализ спектра обобщенного тока статора при обрыве ротора исключает часть боковых полос. Наличие обрыва стержня сопряжено с возникновением асимметрии короткозамкнутого ротора на частотах $\pm sf_1$.



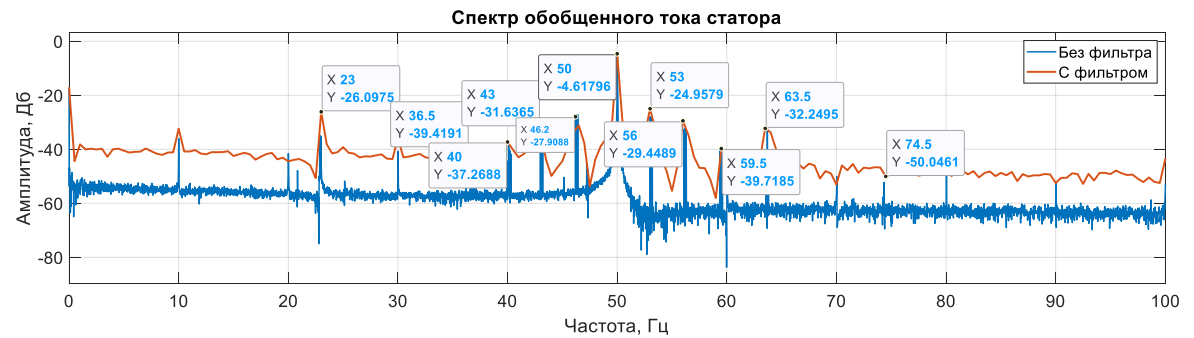
а



б



в



г

Рисунок 2.14 – Спектры обобщенного тока АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б - исправный АД при номинальной нагрузке; в – обрыв 1 стержня; г – обрыв 2 стержней

В свою очередь, данная составляющая вызывает модуляцию тока статора, что приводит к колебаниям вращающего момента ротора на удвоенной частоте скольжения $2sf_1$ и соответствующим колебаниям

скорости вращения ротора. Результаты анализа фазных токов статора АД при нарушениях целостности стержней ротора сведены в таблицу 2.6.

Интенсивность роста амплитуд частотных составляющих тока симметричных относительно основной гармонике в низкочастотной части от количества оборванных стержней в роторе увеличивается по мере их приближения к основной гармонике. При большом количестве оборванных стержней наиболее удаленные частотные составляющие от основной гармонике практически не меняют значения амплитуд.

Таблица 2.6 – Амплитуды частот спектра тока при обрыве стержней ротора

N	k_{m1k}	Расчетная f_{d21} , Гц		АД №1		АД №2		АД №3		Усредненные	
		-	+	f_{d21} Гц	$A(f_{d21})$ Дб	f_{d21} Гц	$A(f_{d21})$ Дб	f_{d21} Гц	$A(f_{d21})$ Дб	f_{d21} Гц	$A(f_{d21})$ Дб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	46,7	53,3	45,2	-35,1	44,9	-38,4	46,7	-38,4	45,6	-37,3
				52,1	-32,9	51,6	-38,9	53,3	-38,9	52,3	-38,9
	2	43,4	56,6	43,4	-44,5	43,4	-44,5	43,4	-44,5	43,4	-44,5
				56,6	-45,9	56,6	-45,9	56,6	-45,9	56,6	-45,9
	3	40,1	59,9	40,1	-52,1	40,1	-52,1	40,1	-52,1	40,1	-52,1
				59,9	-52,5	59,9	-52,5	59,9	-52,5	59,9	-52,5
	4	36,8	63,2	36,8	-57,7	36,8	-57,7	36,8	-57,7	36,8	-57,7
				63,2	-57,9	63,2	-57,9	63,2	-57,9	63,2	-57,9
2	1	46,7	53,3	46,1	-32,7	46,7	-32,7	46,7	-32,7	46,5	-32,7
				53,3	-33,5	53,3	-33,5	53,3	-33,5	53,3	-33,5
	2	43,4	56,6	43,4	-38,8	43,4	-38,8	43,4	-38,8	43,4	-38,8
				56,6	-39,5	56,6	-39,5	56,6	-39,5	56,6	-39,5
	3	40,1	59,9	40,1	-46,5	40,1	-46,5	40,1	-46,5	40,1	-46,5
				59,9	-47,8	59,9	-47,8	59,9	-47,8	59,9	-47,8
	4	36,8	63,2	36,8	-52,4	36,8	-52,4	36,8	-52,4	36,8	-52,4
				63,2	54,2	63,2	54,2	63,2	54,2	63,2	54,2

Примечание: N – количество оборванных стержней; k_{m1k} – коэффициент модуляции характерной гармонической обрыва стержней ротора.

Определение частотных составляющих спектра частот при эксцентриситете в зазоре между статором и ротором электродвигателя производилось с учетом следующих факторов:

- в связи с несовершенством технологии изготовления и сборки в АД изначально присутствует минимальный статический эксцентриситет,

величина которого может быть зафиксирована при спектральном анализе тока после ввода в эксплуатацию.

- асимметрия токов в обмотках статора или ротора приводит к взаимодействию полей с появлением динамического эксцентриситет в зазоре.

Интенсивно проявляется при асимметрии фазных напряжений питания.

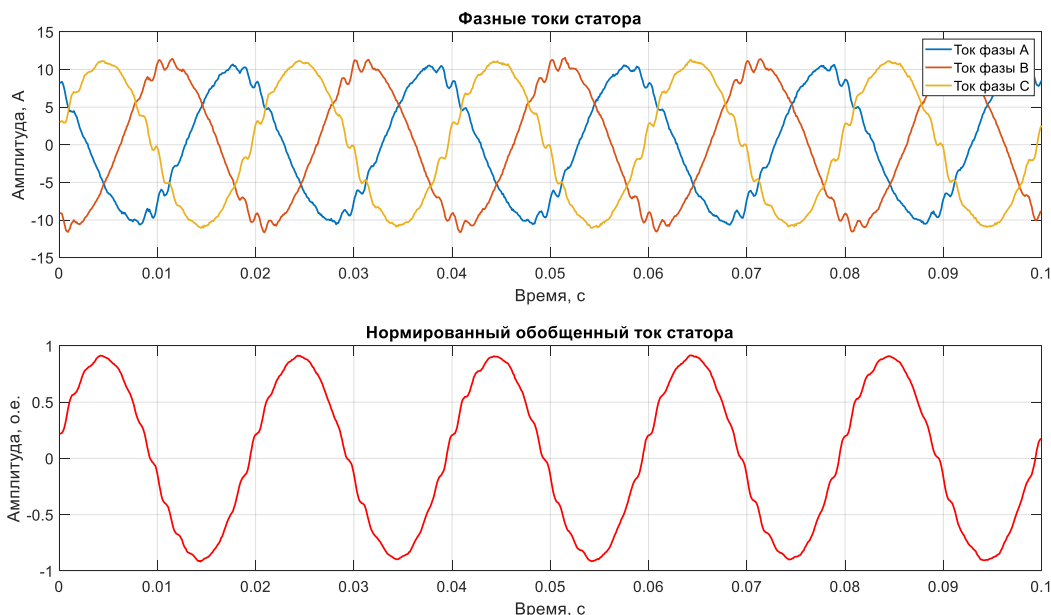


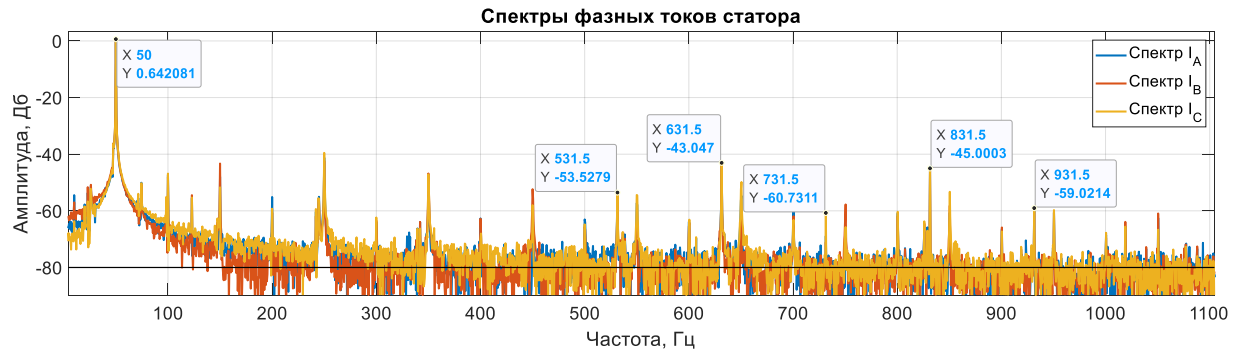
Рисунок 2.15 – Фазные токи АД при эксцентриситете воздушного зазора

При эксцентриситете воздушного зазора в ряде электродвигателей полоса анализируемых частот составляла от 200 до 1500 Гц, при этом спектрограммы анализировались в поддиапазонах: 400÷1000 Гц; 1700÷2400 Гц, согласно (2.15-2.16).

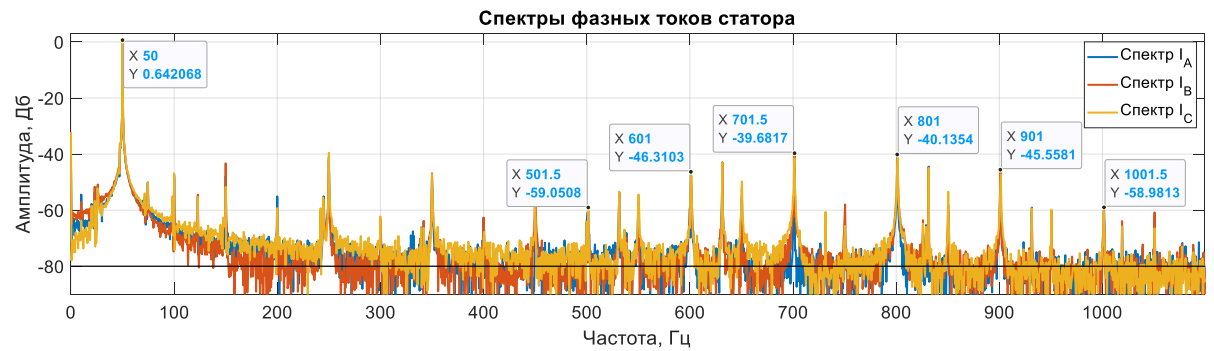
Для исследуемых электродвигателей АД№1-АД№3 амплитуды статического и динамического эксцентриситетов проявлялись в основном в диапазоне 400÷2500 Гц. Причем амплитуды спектральных составляющих тока на разных поддиапазонах в высокой части обладают слабой интенсивностью роста от дефекта ростом, относительно, низкочастотных составляющих, сопоставимых с основной гармоникой.



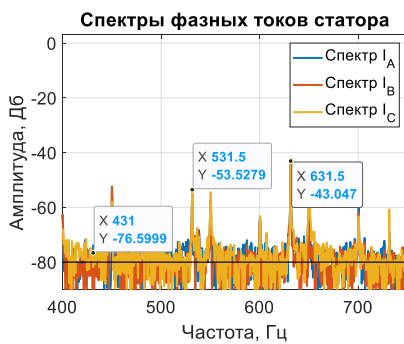
а



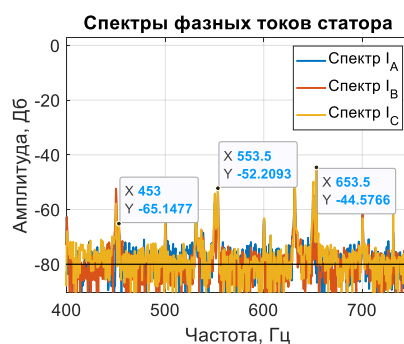
б



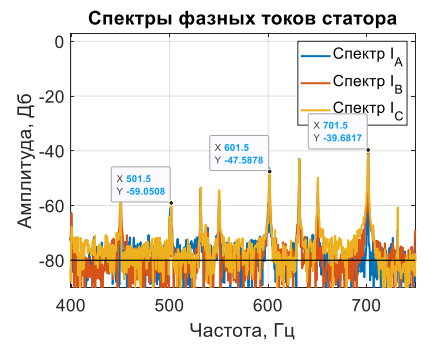
в



г



д



е

Рисунок 2.16 – Спектры фазных токов АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный при номинальной нагрузке; в – критическая стадия динамического эксцентриситета; г – 0 стадия динамического эксцентриситета; д – 1 стадия динамического эксцентриситета; е – 2 стадия динамического эксцентриситета

На рисунке 2.17 приведен ряд некоторых спектрограмм для АД№1, а в таблице 2.7 приведены экспериментальные значения амплитуд спектральных составляющих тока статического и динамического эксцентриситета.

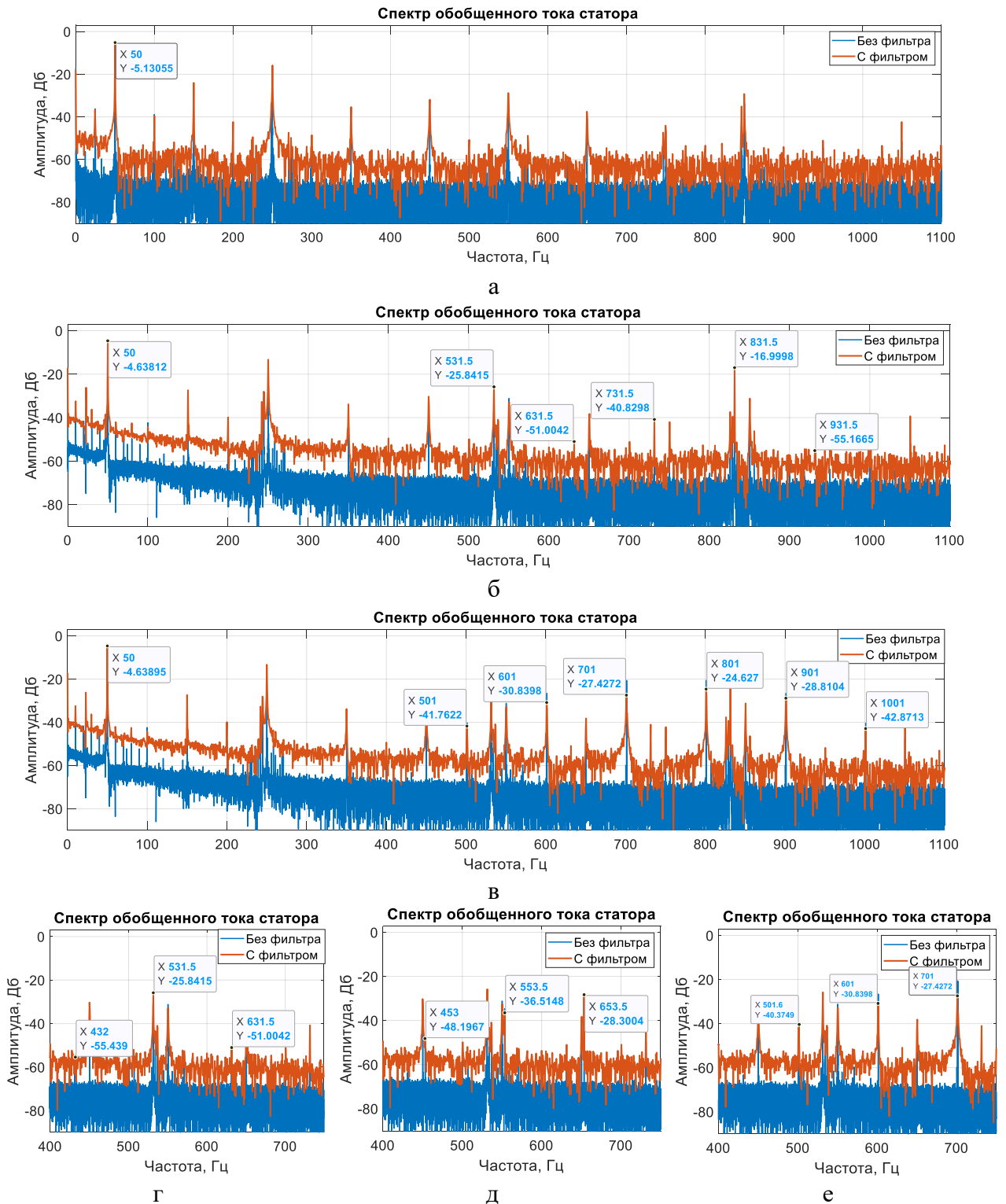


Рисунок 2.17 – Спектры обобщенного тока АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный при номинальной нагрузке; в – критическая стадия динамического эксцентриситета; г – 0 стадия динамического эксцентриситета; д – 1 стадия динамического эксцентриситета; е – 2 стадия динамического эксцентриситета

Таблица 2.7 – Амплитуды частот спектра тока от степени эксцентриситета

n_d	k_{m1k}	Расчетная f_{d32} , Гц		АД №1		АД №2		Усредненные	
		+	-	f_{d32} Гц	$A(f_{d32})$ Дб	f_{d32} Гц	$A(f_{d32})$ Дб	f_{d32} Гц	$A(f_{d32})$ Дб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Статический эксцентриситет									
0	1	729	629	631,4 729	-48,3 -52,7	628,8 729,6	-48,3 -52,7	630,6 729,3	-48,3 -52,7
	2	829	529	531,3 831,5	-57,6 -50,2	531,3 831,5	-57,6 -50,2	531,3 831,5	-57,6 -50,2
	3	929	429	429,6 931,5	-72,4 -64,9	429,6 931,5	-72,4 -64,9	429,6 931,5	-72,4 -64,9
	4	2087	1987	1987 2087	-52,8 -52,7	1987 2087	-52,8 -52,7	1987 2087	-52,8 -52,7
	5	2187	1887	1887 2187	-58,7 -58,9	1887 2187	-58,7 -58,9	1887 2187	-58,7 -58,9
	6	2287	1787	1787 2287	-72,9 -72,5	1787 2287	-72,9 -72,5	1787 2287	-72,9 -72,5
Динамический эксцентриситет									
1	1	753,2	653,2	653,3 753,3	-41,8 -41,9	653,3 753,3	-41,8 -41,9	653,3 753,3	-41,8 -41,9
	2	853,25	553,25	553,3 853,3	-47,9 -47,8	553,3 853,3	-47,9 -47,8	553,3 853,3	-47,9 -47,8
	3	953,25	453,25	453,3 953,3	-61,9 -61,7	453,3 953,3	-61,9 -61,7	453,3 953,3	-61,9 -61,7
	4	2159,75	2059,75	2059,4 2159,1	-41,9 -41,8	2059,4 2159,1	-41,9 -41,8	2059,4 2159,1	-41,9 -41,8
	5	2259,75	1959,75	1959,3 2259	-47,9 -47,8	1959,3 2259	-47,9 -47,8	1959,3 2259	-47,9 -47,8
	6	2359,75	1859,75	1859,3 2359,3	-61,8 -61,7	1859,3 2359,3	-61,8 -61,7	1859,3 2359,3	-61,8 -61,7
2	1	801,75	701,75	701,3 801,3	-32,7 -32,7	701,3 801,3	-32,7 -32,7	701,3 801,3	-32,7 -32,7
	2	901,75	601,75	601,3 901,3	-38,8 38,8	601,3 901,3	-38,8 38,8	601,3 901,3	-38,8 38,8
	3	1001,75	501,75	501,6 1001,4	-52,7 -53	501,6 1001,4	-52,7 -53	501,6 1001,4	-52,7 -53
	4	2305,25	2205,25	2205,4 2305,1	-32,7 -32,7	2205,4 2305,1	-32,7 -32,7	2205,4 2305,1	-32,7 -32,7
	5	2405,25	2105,25	2105,3 2405	-38,8 -38,8	2105,3 2405	-38,8 -38,8	2105,3 2405	-38,8 -38,8
	6	2505,25	2005,25	2005,3 x	-52,8 x	2005,3 x	-52,8 x	2005,3 x	-52,8 x

Примечание: n_d – степень эксцентриситета.

Идентификация статического и динамического эксцентриситета показала, что амплитуда составляющих спектра тока при неравномерности воздушного зазора идентифицируется на поддиапазоне частот от 400÷1000 Гц и практически не определяется в поддиапазоне 1700÷2400 Гц.

Степень эксцентриситета, как динамического, так и статического, определять учитывая влияние на него других дефектов (КЗ витков статора, обрыв стержней ротора, несоосность валов) и качество питающей питания. При расчете значений диагностических частот эксцентриситета требуется более высокая точность в определении величины текущего скольжения.

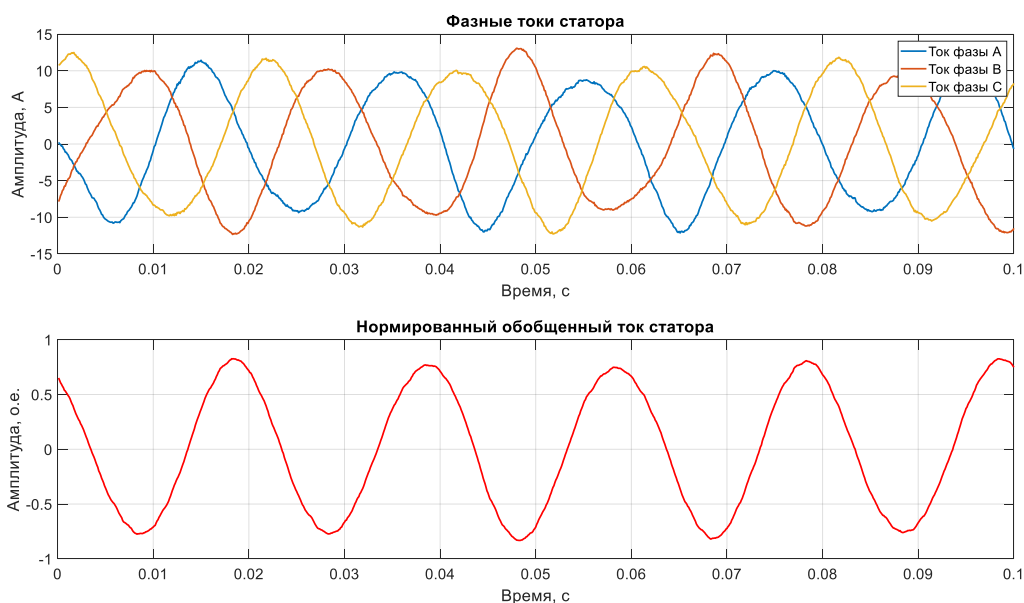


Рисунок 2.18 – Фазные токи АД при дефектах подшипников

Анализ частотных составляющих спектра тока при износе подшипников электродвигателях производился путем создания количества дефектов и их величин. Дефекты в виде углублений - раковин в новом подшипнике создавались путем сверления внутреннего и внешнего кольца с увеличением их количества и глубины.

На первом этапе регистрировались токи с новыми подшипниками, затем производилась замена на дефектные с дальнейшим анализом тока. Спектральный анализ тока АД с дефектом подшипника выполнялся на расчетном диапазоне частот от 0 до 150 Гц, согласно (2.20-2.22). Полученные таким образом спектрограммы представлены на рисунке 2.19.

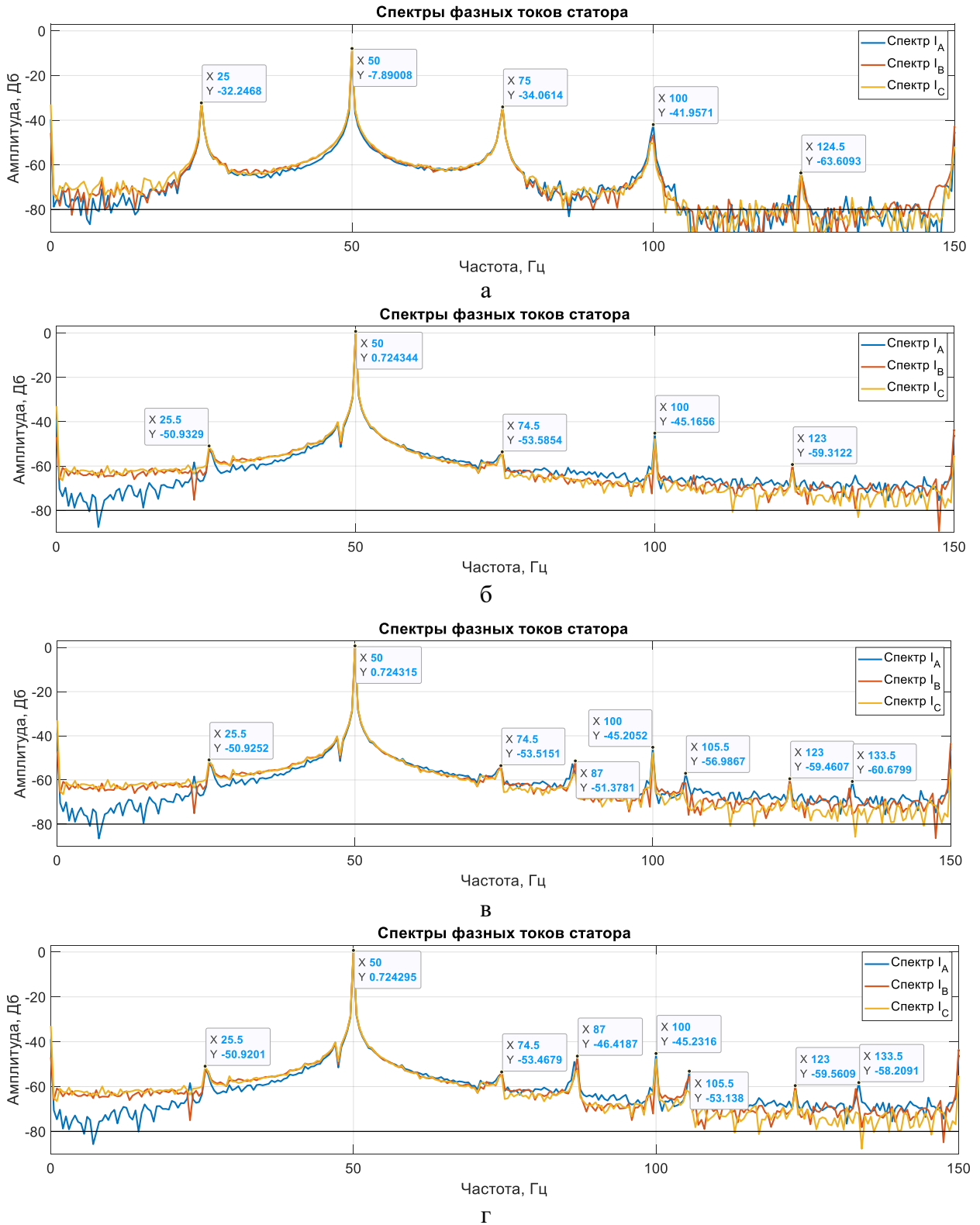


Рисунок 2.19 – Спектры фазных токов АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД при номинальной нагрузке; в – при 1 раковине внутреннего кольца; г – при 2 раковинах внутреннего кольца

В результате рост амплитуд частотных составляющих спектра тока практически не зависит от общего износа подшипника, а лишь от количества повреждений (раковин внутреннего и внешнего кольца, разрушенных тел

качений) (рисунки 2.19-2.20). Результаты выявления диагностических частот, определяемых по формулам (2.20-2.22), сведены в таблицу 2.8, а характер изменений амплитуд частотных составляющих отражен на рисунках 2.19-2.20.

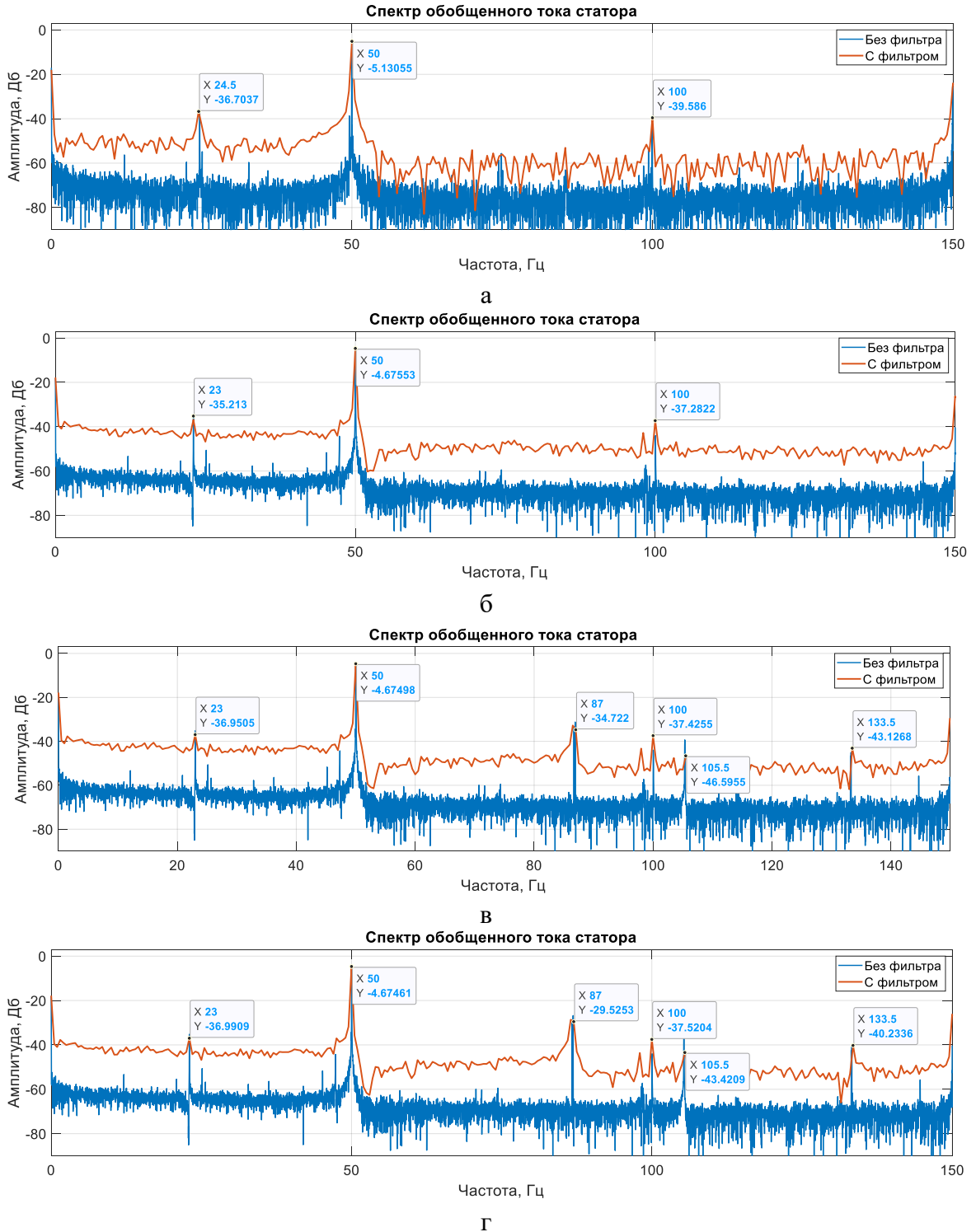


Рисунок 2.20 – Спектры обобщенного тока АД: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД при номинальной нагрузке; в – при 1 раковине внутреннего кольца; г – при 2 раковинах внутреннего кольца

При увеличении глубины дефекта наружного кольца в сравнении с исправным подшипником изменений амплитуд спектра выявлено не было, что говорит либо о низкой чувствительности к глубине дефекта, либо о связи дефекта только с количеством раковин.

Таблица 2.8 – Амплитуды частот спектра тока от износа подшипников

<i>n</i>	Расчетная f_d, Гц	АД №1		АД №2		АД №3		Усредненные	
		f_d Гц	$A(f_d)$ Дб	f_d Гц	$A(f_d)$ Дб	f_d Гц	$A(f_d)$ Дб	f_d, Гц	$A(f_d)$ Дб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	105,3	105,1	-67,3	105,8	-67,3	104,9	-67,3	105,3	-67,3
2		104,3	-57,2	105,7	-57,2	105,4	-57,2	105,1	-57,2
3		102,8	-52,6	103,4	-52,6	105,9	-52,6	104,0	-52,6
1	133,6	133,3	-74,1	133,3	-74,1	133,3	-74,1	133,3	-74,1
2		133,3	-63,4	133,3	-63,4	133,3	-63,4	133,3	-63,4
3		133,3	-58,8	133,3	-58,8	133,3	-58,8	133,3	-58,8
1	86,9	86,9	-59,1	86,9	-59,1	86,9	-59,1	86,9	-59,1
2		86,9	-49,5	86,9	-49,5	86,9	-49,5	86,9	-49,5
3		86,9	-45,1	86,9	-45,1	86,9	-45,1	86,9	-45,1

Примечание: ***n*** – количество раковин/тел качения.

По результатам экспериментов выделены следующие особенности:

- дефекты дорожек колец и тел качения в виде трещин, раковин, вмятин не идентифицируются в спектре по их глубине, а только по количеству.

- дефекты износа дорожек наружного и/или внутреннего кольца, а также износ тел качения идентифицируются в спектре, только если совокупно увеличиваю люфт ротора (2.20-2.22).

С учетом экспериментальных результатов исследования по идентификации частотных составляющих в спектре потребляемого тока был разработан непрерывный алгоритм поиска дефектов в АД (рисунок 2.21).

Работа алгоритма состоит из нескольких этапов. Первый этап заключается в расчете параметров и характеристик АД по паспортным данным с определением режима работы [118]. По паспортным и конструктивным параметрам электродвигателя вычисляются частоты (2.1-2.2, 2.8-2.10, 2.15-2.16, 2.20-2.22), на которых ожидаются проявления дефектов. Второй этап представляет синхронную запись токов и напряжений во времени с частотой дискретизации $f_d = 10$ кГц и предобработки данных.

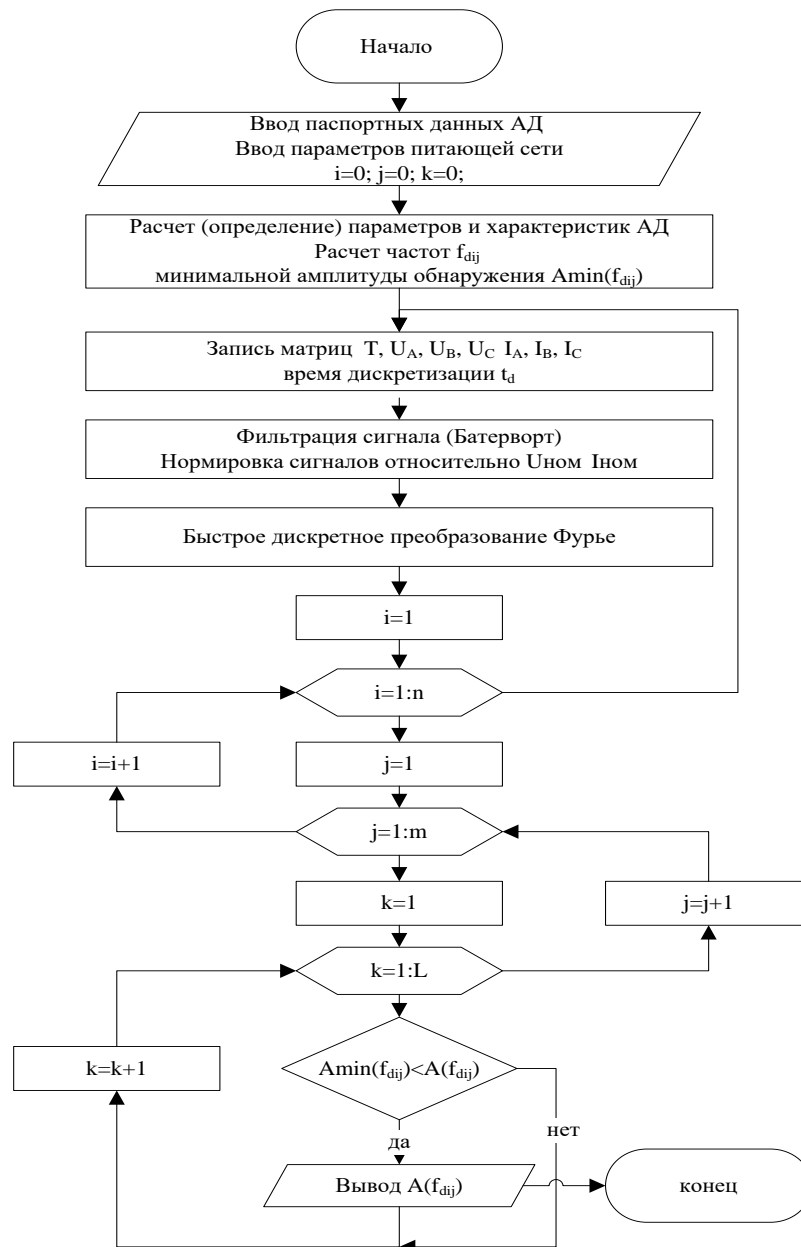


Рисунок 2.21 – Алгоритм поиска частотных составляющих в спектре потребляемого тока АД

Предобработка включает в себя низкочастотную фильтрацию с полосой 2 кГц, исключая паразитные частоты, вызванные шумом. Сигналы нормируются относительно номинальных напряжения питания и тока АД. Отфильтрованный и нормированный сигнал при помощи быстрого преобразования Фурье раскладывается на амплитудно-частотный спектр. Ввиду искажений в напряжении сети из спектра тока исключаются составляющие, совпадающие со спектром напряжения (рисунок 2.22), оставляя для дальнейшего анализа частоты, проявляющиеся только в спектре тока.

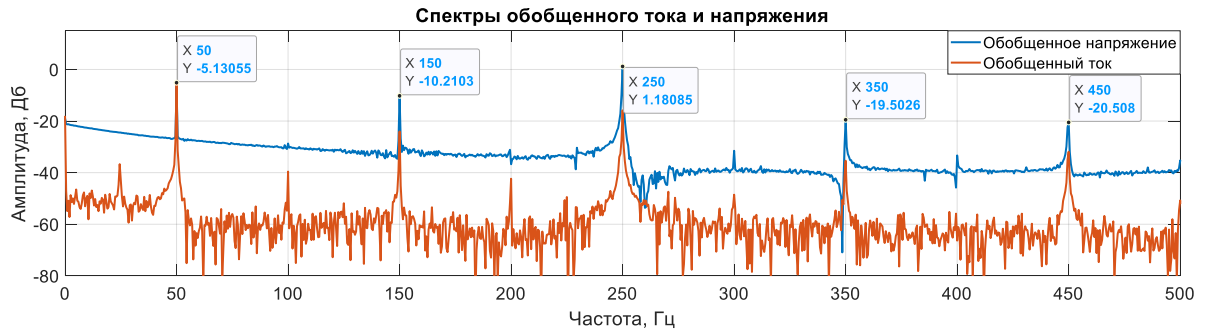


Рисунок 2.22 – Спектры обобщённого тока и напряжения

На третьем этапе выполняется циклический поиск расчетных частот f_{dij} с учетом коэффициента модуляции в фактическом спектре тока по пороговым значениям амплитуд проявления дефекта $A_{min}(f_{dij})$. После цикла поиска частот выводится матрица с нулевыми значениями или амплитудными, характеризующими наличие или отсутствие дефекта.

Результатом работы алгоритма стало определение диапазонов поиска каждой характерной частоты и пороговых значений амплитуд.

Таблица 2.9 – Параметры диагностирования дефектов АД

	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Порог обнаружения Дб	Предельное значение A , Дб	Диапазон вариации амплитуд Δf_d
1	2	3	4	5	6	7
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-70	-29.0	±0.8
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-63	-45.0	±0.4
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-60	-25	±1.2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	-57	x	x
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-72	-23.0 -23.0	±1.5
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-75	-24.0 -26.6	±1.5
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-65	-35.0	±0.5
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-62	-39.0	±0.5
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-64	-31.0	±0.5

2.2 Гармонический состав тока и напряжения АД при питании от АИН

Рассматриваем АЭП с полупроводниковым преобразователем частоты, включающим, согласно упрощенной структуре, 6-ти импульсный неуправляемый выпрямитель (НВ), звено постоянного тока (ЗПТ) и 2-х уровневый автономный инвертор напряжения (АИН) [43].

Фазное напряжение, подводимое к АД от автономного инвертора напряжения, содержит гармонические составляющие (2.32), определяющиеся в соответствии с исследуемой двухуровневой структурой инвертора [51].

$$u_{\phi}(t) = U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \\ + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t, \quad (2.32)$$

где U_n – амплитуды основной и высших гармоник напряжения В, кратные основной частоте вращения $\omega_1 = 2\pi f_1$, рад/с;

$n = k \cdot 6 \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13 \dots$ – номера гармоник;

U_m – амплитуды гармоник напряжения В, образованные несущей частотой $\omega_H = 2\pi f_H$, рад/с;

f_1, f_H – основная и несущая частоты, Гц;

U_{nm} – амплитуды комбинационных гармоник В, вызванных взаимодействием основной и несущей частот;

$m = 1, 2, 3 \dots$ и $v = 1, 2, 4, 5, 7 \dots$ – кратности несущей ω_H и основной ω_1 частот вращения.

Гармонический состав фазного напряжения на выходе АИН [64] определяет гармонический состав фазного тока, как:

$$i_{\phi}(t) = I_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t + \varphi) + \\ + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) t, \quad (2.33)$$

где I_n – амплитудные значения гармоник тока А, кратные основной частоте вращения $\omega_1 = 2\pi f_1$, рад/с;

$n = k \cdot 6 \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13 \dots$ – номера гармоник;

I_m – амплитуды гармоник тока статора А, кратные несущей частоте $\omega_H = 2\pi f_H$, рад/с;

f_1, f_H – основная и несущая частоты, Гц;

I_{nm} – амплитуды комбинационных гармоник тока статора, А, вызванных взаимодействием основной и несущей частот;

$m = 1, 2, 3...$ и $v = 1, 2, 4, 5, 7...$ – кратности несущей ω_H и основной ω_1 частот вращения.

Ввиду того, что АД является трехфазной симметричной активно-индуктивной нагрузкой, а также при учете выходных дросселей АИН, высшие гармонические составляющие тока будут ограничены до минимальных значений (рисунок 2.23), с коэффициентом гармонических искажений не превышающим 1-2.5% [68], токи на выходе инвертора при подключении АД принимаем как синусоидальные (квазисинусоидальные).

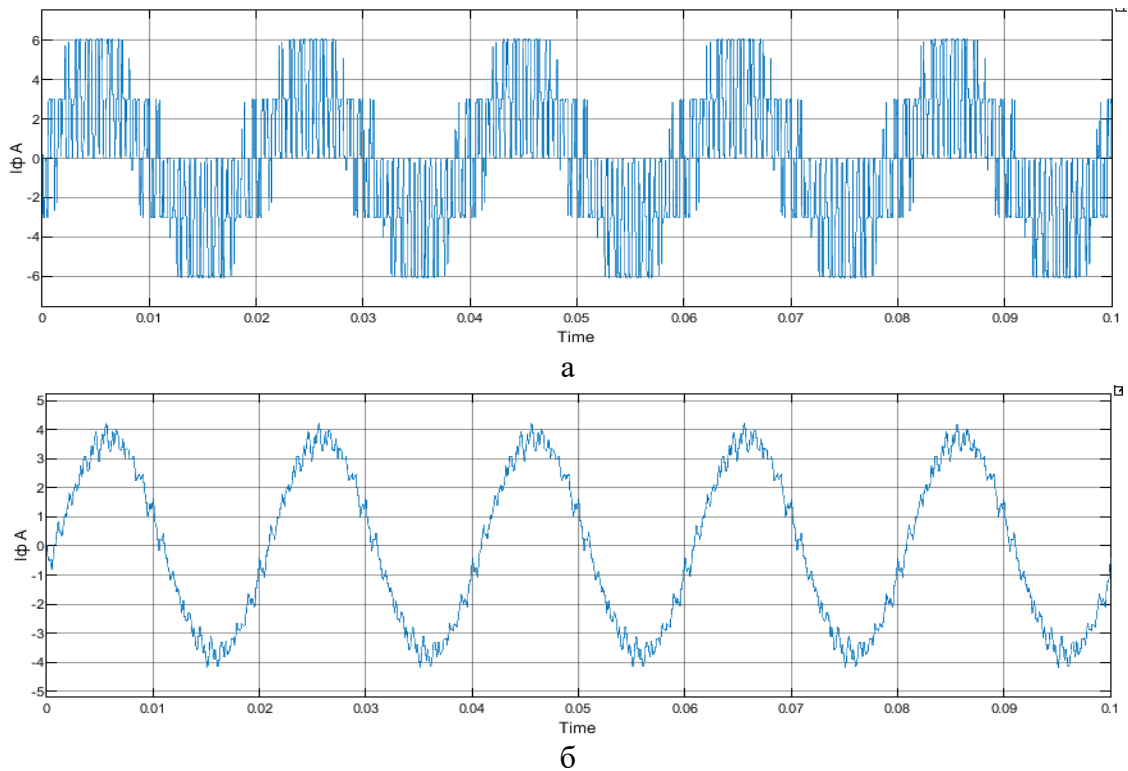


Рисунок 2.23 – Ток на выходе АИН: а – при активной нагрузке; б – при активно-индуктивной нагрузке

При этом, учитывая износ и наличие дефектов, где источником искажений выступает АД, ток статора согласно (2.29 и 2.33) примет вид:

$$\begin{aligned}
 i_{ст}(t) = i_{\phi}(t) + i_{dij}(t) = & I_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t + \varphi) + \\
 & + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) t + \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot f_{dij} \cdot t) \right] \quad (2.34)
 \end{aligned}$$

Так как частотные составляющие (2.1-2.2, 2.8-2.10, 2.15-2.16, 2.20-2.22) связаны с основной частотой f_1 и скольжением АД s , а при их вариации и

частотном регулировании с переменной нагрузкой требуется адаптация алгоритма (рисунок 2.21) к АЭП.

Многофакторное воздействие на АД при питании от АИН (электрическое, магнитное, тепловое, механическое и др.) влияет на амплитудные значения характерных частот, отражающих наличие дефектов. Однако установленные однозначные зависимости изменения амплитуд в соответствии с режимом работы, видом и величиной нагрузки отсутствуют.

Отсутствие данного рода зависимостей не позволяет нормировать амплитудные значения частот спектра, вызванные дефектами, по уровню и виду неисправности с оценкой влияния на энергоэффективность и работоспособность электропривода.

С целью решения данной задачи требуется определить критерии энергоэффективности и работоспособности АЭП.

2.3 Критерии энергоэффективности АЭП при неисправностях АД

Для выделения критериев необходимо выполнить ряд задач. Первая задача состоит в классификации объекта диагностики. За укрупненный объект выбираем систему электроприводов цеха.

Классификация осуществлялась по следующим критериям [114]:

1. По классу мощности (малой - до 0,4 кВт, средней 0,4-200 кВт, мощные до 2 МВт, сверхмощные свыше 2 МВт);
2. По статическим и динамическим характеристикам регулируемого электропривода;
3. По степени ответственности электропривода (допустимое время простоя без экономического ущерба: 1-10 суток; 1-5 часов; менее 1 час; 10-30 минут, 10-60 секунд).

Второй задачей является формирование групп электроприводов согласно критериям, указанным выше. Для каждой из групп определяется методика диагностики. Основой группой большинства предприятий является электропривод средней и малой мощности с низкими требованиями по динамике и времени простоя менее 1 часа [115, 94]. Анализ методов

диагностики электромеханического оборудования, в частности, применяемых к электроприводу малой и средней мощности, преобладает метод на основе анализа электрических параметров и координат [111]. В качестве первичных преобразователей необходимы два комплекта датчиков тока и напряжения на эффекте Холла с минимальной требуемой частотой дискретизации [89, 103]. Вторичные и последующие преобразования могут производиться на микроконтроллере, персональном компьютере или облачном пространстве.

В основу подхода заложен метод спектрального анализа тока посредством быстрого дискретного преобразования Фурье [108]. В качестве энергетического критерия был выбран коэффициент искажения синусоидальности кривой тока $K_{I\phi}$ [20], подводимой к электродвигателю, поскольку АД обладает оптимальными энергетическими показателями при протекании по обмоткам синусоидального тока. Любые искажения в обмотке статора приводят к увеличению потерь, а следовательно к неэффективному использованию электроэнергии [20] (2.35):

$$K_{I1\phi} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}}, \quad (2.35)$$

где $I_{(1)}$ – амплитудное значение основной гармоники фазного тока на выходе инвертора, А;

$I_{(n)}$ – амплитудные значения гармоник в фазном токе, кратных основной частоте, на выходе инвертора, А.

Помимо искажений, кратных основной гармонике, присутствуют гармонические составляющие, кратные несущей частоте, которые учитываются как (2.36):

$$K_{I2\phi} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{m=3} I_{(m)}^2}}{I_{(1)}}, \quad (2.36)$$

где $I_{(1)}$ – амплитудное значение основной гармоники фазного тока на выходе инвертора, А;

$I_{(m)}$ – амплитудные значения гармоник в фазном токе на выходе инвертора, кратных частоте коммутации силовых ключей, А.

При этом в условиях возникновения неисправностей происходит модуляция гармонических искажений согласно (2.34), а влияние их на основную гармонику определяется как (2.37):

$$K_{I3\phi} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{dij}^2}}{I_{(1)}}, \quad (2.37)$$

где $I_{(1)}$ – амплитудное значение основной гармоники фазного тока на выходе инвертора, А;

I_{dij} – амплитудные значения гармонических составляющих тока, формируемые при дефектах АД, А.

С учетом (2.33-2.36) общие искажения тока должны учитываться как (2.38):

$$K_I = \frac{\sqrt{(K_{I1A}+K_{I2A}+K_{I3A})^2+(K_{I1B}+K_{I2B}+K_{I3B})^2+(K_{I1C}+K_{I2C}+K_{I3C})^2}}{3}, \quad (2.38)$$

Коэффициенты $K_{I1\phi}$ и $K_{I2\phi}$ определяют искажения, вносимые инвертором с учетом АД, как симметричной активно-индуктивной нагрузки, составляют 1-2.5% [68]. Вид дефекта будет определять интенсивность роста коэффициента искажения (рисунок 2.24) [117].

Данный показатель определяет характер изменения потерь из уравнения мгновенной мощности [32], если уравнения тока (2.34) и напряжения (2.32) переписать как сумму мгновенных значений, то мощность выразится как (2.40).

$$u(t) = u_n(t) + u_m(t) + u_{nm}(t) \quad (2.38)$$

$$i(t) = i_n(t) + i_m(t) + i_{nm}(t) + i_{dij}(t) \quad (2.39)$$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = [u_n(t) + u_m(t) + u_{nm}(t)] \cdot [i_n(t) + i_m(t) + i_{nm}(t) + i_{dij}(t)] = [u_n(t) + u_m(t) + u_{nm}(t)] \cdot [i_n(t) + i_m(t) + i_{nm}(t)] + (i_{dij}(t) \cdot [u_n(t) + u_m(t) + u_{nm}(t)]) = P_0(t) + p_{dij}(t), \quad (2.40)$$

где $u_n(t)$, $i_n(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока В, А, кратные основной частоте вращения;

$n = k \cdot 6 \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13 \dots$ – номера гармоник;

$u_m(t)$, $i_m(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока В, А, образованные несущей частотой ω_H ;

$u_m(t)$, $i_m(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока комбинационных гармоник, В, А;

$i_m(t)$ – мгновенные значения тока, образованные частотными составляющими дефектов, А;

$P_0(t)$ – постоянная составляющая мгновенной потребляемой мощности, кВт;

$p_{dij}(t)$ – мгновенная мощность потерь, вызванная дефектами, кВт.

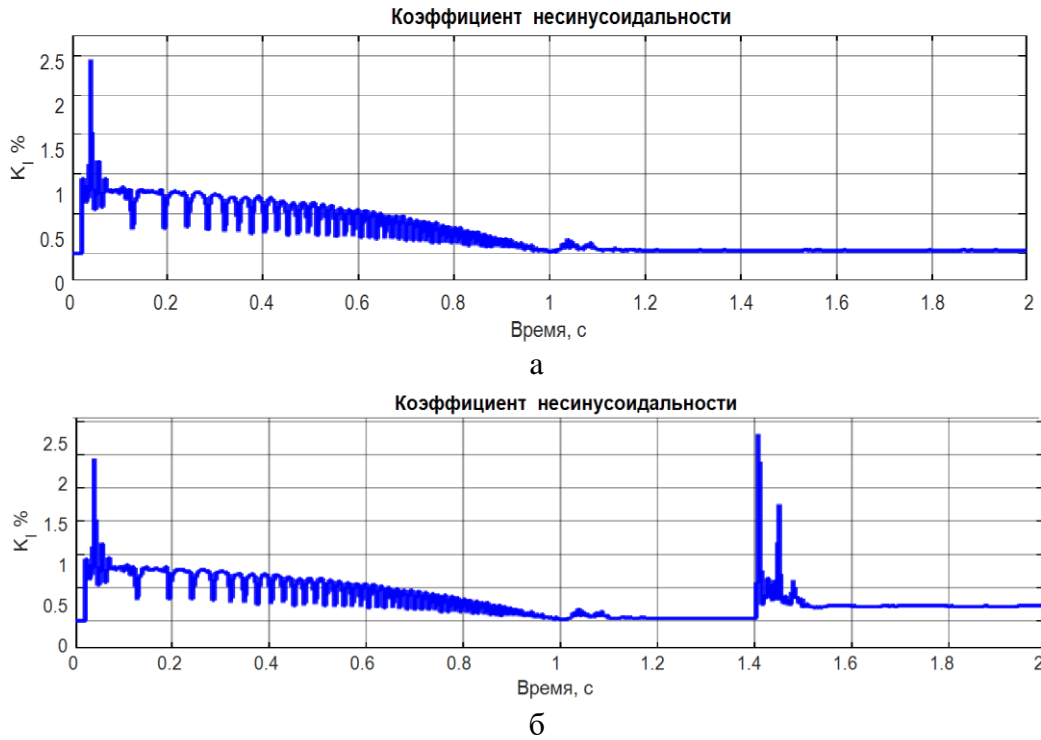


Рисунок 2.24 – Изменения коэффициента искажения синусоидальности тока:
 а – исправного АД; б – с появлением дефекта АД
 (пуск при $t=0-1,2$ с; проявление дефекта в момент $t=1,4$ с)

Мощность потерь, определяемая неисправностями, с учетом (2.32, 2.34) примет вид:

$$p_{dij}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{dij}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{dij} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t), \quad (2.41)$$

Ожидаемая величина потерь по каждому виду дефекта определяется системой уравнений (2.42).

$$\begin{cases} p_{d1j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d1j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d1j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \\ p_{d2j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d2j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d2j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \\ p_{d3j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d3j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d3j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \\ p_{d4j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d4j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d4j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \end{cases} \quad (2.42)$$

Интенсивность проявления неисправностей асинхронного двигателя АИР132М (Таблицы 2.1, 2.2) связана с ростом потребляемой (активной, реактивной, полной) мощности (рисунок 2.25 и таблица 2.10).

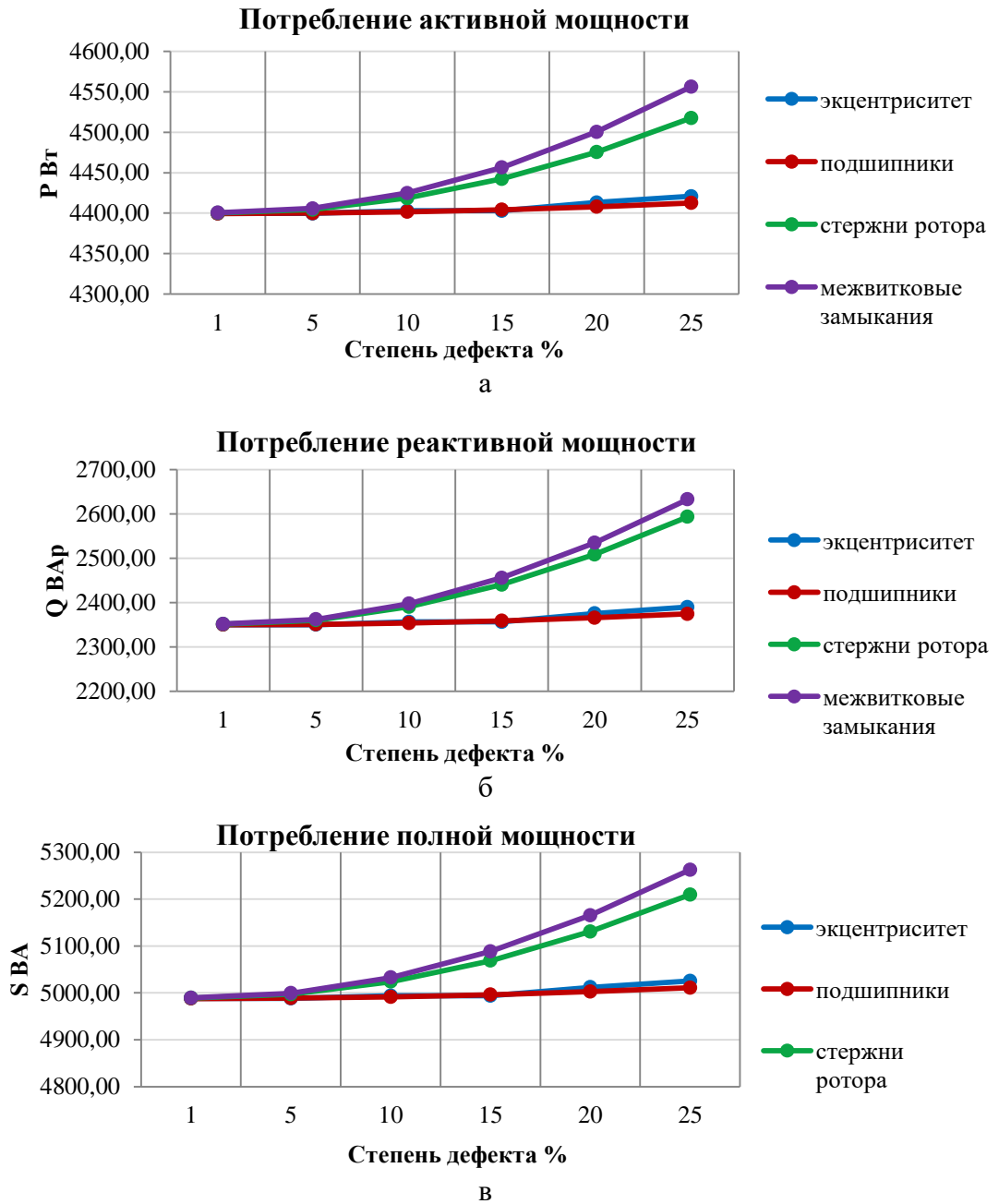


Рисунок 2.26 – Изменения потребляемой мощности АД при степени дефекта: а – активная мощность, Вт; б – реактивная мощность, ВАр; в – полная мощность, ВА

Вид и уровень проявления дефекта отражается в росте потребления как активной, так реактивной и полной мощностей с внесением искажений в форму мгновенной мощности. Проинтегрировав отдельно уравнения (2.42), видим влияние вида дефекта на потребляемую мощность как на рисунке 2.26.

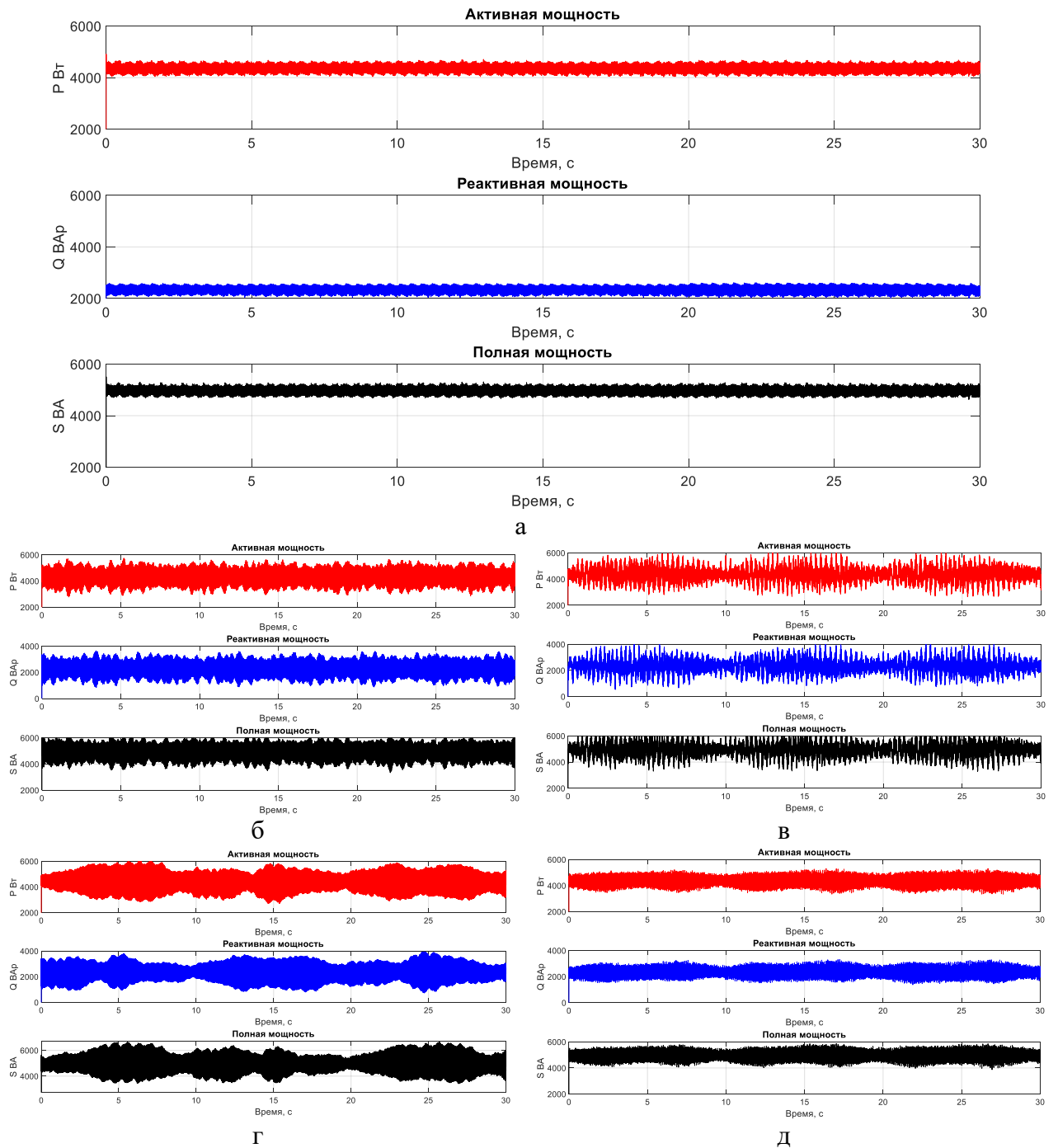


Рисунок 2.26 – Потребляемая мощность АД: а – в исправном состоянии; б – с дефектами статора; в – с дефектами ротора; г – при эксцентриситете; д – с дефектами подшипника

Таблица 2.10 – Потери активной мощности от степени дефекта

Потери, кВт	Степень дефекта, %				
	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6
p_{d1j}	1,00	6,30	25,30	57,00	101,00
p_{d2j}	0,00	0,50	2,10	4,70	8,40
p_{d3j}	0,10	0,10	3,40	3,40	13,60
p_{d4j}	0,70	4,80	19,10	42,90	76,00

Примечание: p_{d1j} – потери мощности при дефектах в статоре; p_{d2j} – потери мощности при дефектах в подшипниках; p_{d3j} – потери мощности при эксцентриситете; p_{d4j} – потери мощности при дефектах в роторе.

Анализ роста потерь и, соответственно, потребляемой АД мощности при развитии дефектов показал, что зависимости (рисунок 2.25) определяют характер изменения параметров схемы замещения и косвенно влияют на коэффициент мощности АД.

Коэффициент искажения синусоидальности $K_{I3\phi}$ потребляемого тока при наличии дефектов АД определяет характер роста потребляемой мощности и изменения коэффициента мощности двигателя. Следовательно, $K_{I3\phi}$ характеризует энергоэффективность АЭП в зависимости от технического состояния, и его необходимо учитывать в качестве критерия энергоэффективности.

2.4 Критерии работоспособности АЭП при неисправностях АД

Работоспособность – это состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданную функцию с параметрами, установленными требованиями технической документации [19].

Основными функциями электропривода являются точность и быстродействие регулирования частоты вращения и момента на валу электродвигателя. Требования по точности и быстродействию предъявляются в зависимости от системы управления.

Рассматривая классические замкнутые ССУ [41, 65, 66] и ВСУ [15, 28], системы управления по частоте вращения ротора (рабочего органа), очевидно, что поддержание достигается за счет большего потребления тока или повышения напряжения на ЗПТ при неограниченном источнике питания.

Исходя из спектрального анализа искажений тока статора, вызванных дефектами, можно сделать вывод, что это приводит не только к несинусоидальности тока, а к снижению коэффициента мощности и увеличению потерь, но и участвует в образовании электромагнитного момента [52] асинхронного двигателя (2.43).

$$M_e = \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_{st} \psi_r \sin(\theta), \quad (2.43)$$

где z_p – количество пар полюсов асинхронного двигателя;

L_m – индуктивность намагничивания, Гн;

L_r – индуктивность обмотки ротора, Гн;

ψ_r – потокосцепление ротора, Вб;

θ – угол между векторами тока статора I_{st} и потокосцеплением ротора ψ_r , рад.

Соответственно, при питании АД от АИН постоянный электромагнитный момент образуется при взаимодействии гармоник тока статора и потокосцепления ротора одного порядка, кратных основной частоте. Взаимодействие гармоник разных порядков приводит к образованию пульсирующих составляющих электромагнитного момента (рисунок 2.26). Знакопеременные составляющие электромагнитного момента обусловлены структурой силовых полупроводниковых преобразователей и их пульсностью, что, в свою очередь, является одной из проблем электромеханической совместимости [1, 12, 64]. Таким образом, результирующий электромагнитный момент можно представить в виде (2.44):

$$M_e = M_{(n)} + M_{(qp)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{st(n)} \psi_{r(n)} \sin(\theta) + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} I_{st(q)} \psi_{r(p)} \sin(\theta_{qp}), \quad (2.44)$$

где $M_{(n)}$, $M_{(qp)}$ – составляющие электромагнитного момента Н·м, создаваемые в результате взаимодействия n -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, q -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора;

$I_{st(n)}$, $I_{st(q)}$, $\psi_{r(n)}$, $\psi_{r(p)}$ – гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора А, Вб;

θ_{qp} – угол между q -ой гармоникой тока статора и p -ой гармоникой потокосцепления ротора, рад.

Взаимодействие постоянного $M_{(n)}$ и знакопеременного $M_{(qp)}$ моментов приводит к пульсации результирующего электромагнитного момента (рисунок 2.27). Амплитуда и частота пульсаций определяется не только системой управления и количеством замкнутых контуров регулирования

координат, но и типом применяемой ШИМ (синусоидальная, пространственно-векторная).

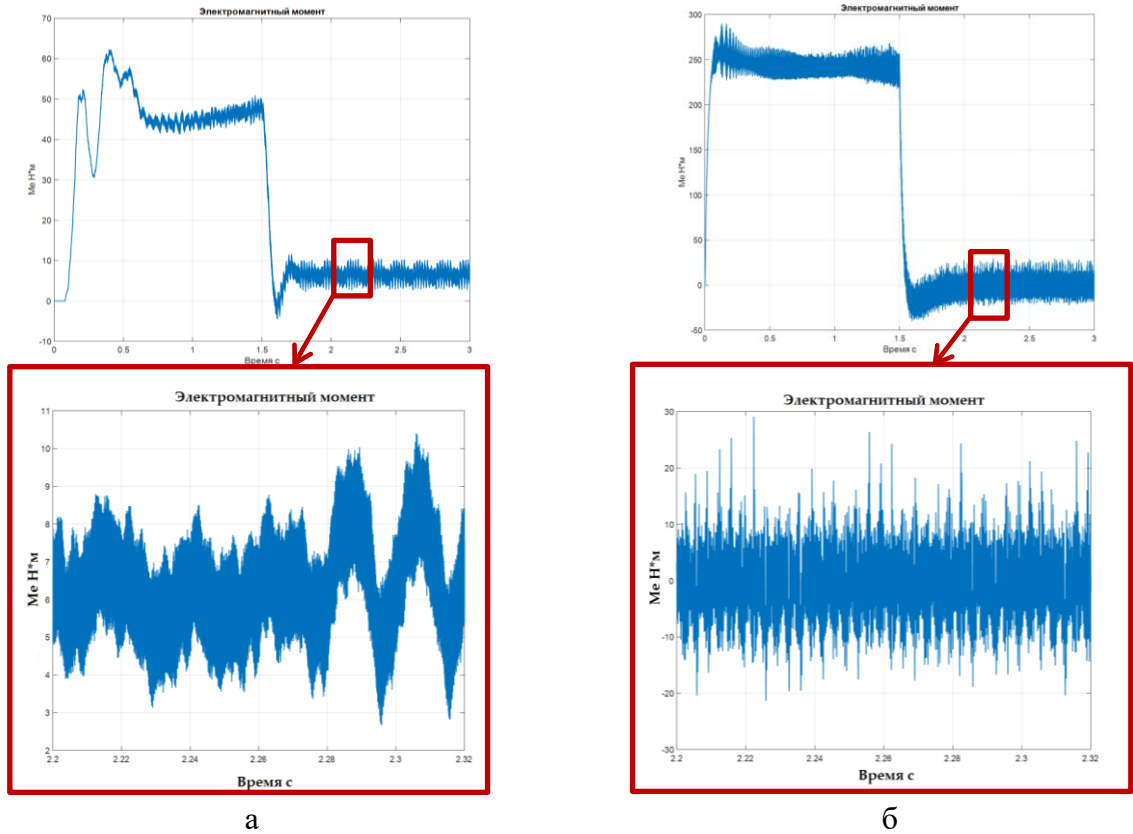


Рисунок 2.27 – Пульсации электромагнитного момента: а – ССУ замкнутая по скорости с синусоидальной ШИМ; б – ВСУ замкнутая по скорости с пространственно-векторной ШИМ

Коэффициент пульсации электромагнитного момента, определяемый согласно [8, 9], как:

$$K_{Me} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2} / M_{av}, \quad (2.45)$$

где M_{av} – среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя, Н·м;

K_{Me} – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты, о.е.

Учитывая пульсирующие электромагнитные моменты, образованные дефектами электрической или механической частей асинхронного двигателя [64] результирующий электромагнитный момент (2.45) можно представить в виде (2.46):

$$M_e = M_{(n)} + M_{(qp)} + M_{(di)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{st(n)} \psi_{r(n)} \sin(\theta) + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} I_{st(q)} \psi_{r(p)} \sin(\theta_{qp}) + \sum_{i=1}^{i=\infty} I_{st(di)} \psi_{r(di)} \sin(\theta_{di}), \quad (2.46)$$

где $M_{(di)}$ – составляющие электромагнитного момента, создаваемые в результате взаимодействия n -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, di -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, q -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора, Н·м;

$I_{st(di)}, \psi_{r(di)}$ – гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора А, Вб;

θ_{di} – угол между di -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, рад.

Коэффициент пульсации электромагнитного момента при этом необходимо учитывать как суммарный с учетом (2.43), (2.45) в виде (2.47):

$$\sum K_{Me} = \sqrt{(\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2 + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} M_{(qp)}^2)} / M_{av} + \sqrt{\sum_{i=2}^{i=\infty} M_{(di)}^2} / M_{av} = K_{Me(n)} + K_{Me}^*, \quad (2.47)$$

где M_{av} – среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя, Н·м;

$K_{Me(n)}$ – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты, о.е.;

K_{Me}^* – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый видом и уровнем дефекта АД и ИМ электропривода, о.е.

При проявлении дефекта АД в исследуемых системах управления ЭП пульсации электромагнитного момента увеличивают амплитуду и частоту (рисунок 2.28).

Анализ изменения коэффициента пульсаций электромагнитного момента во времени (рисунок 2.29) характеризует пусковые пульсации в номинальном режиме, определяемые конфигурациями силового преобразователя, и при возникновении неисправностей.

При пуске коэффициент пульсации $\sum K_{Me}$ одномоментно может достигать 20 %. Двухуровневый инвертор напряжения с 6-ти пульсной схемой с замкнутой ССУ по частоте вращения ротора (ИМ) с синусоидальной ШИМ позволяет обеспечить $K_{Me}=2-5\%$ (рисунок 2.29), а ВСУ с пространственно-векторной ШИМ обеспечивает $K_{Me}=7-10\%$.

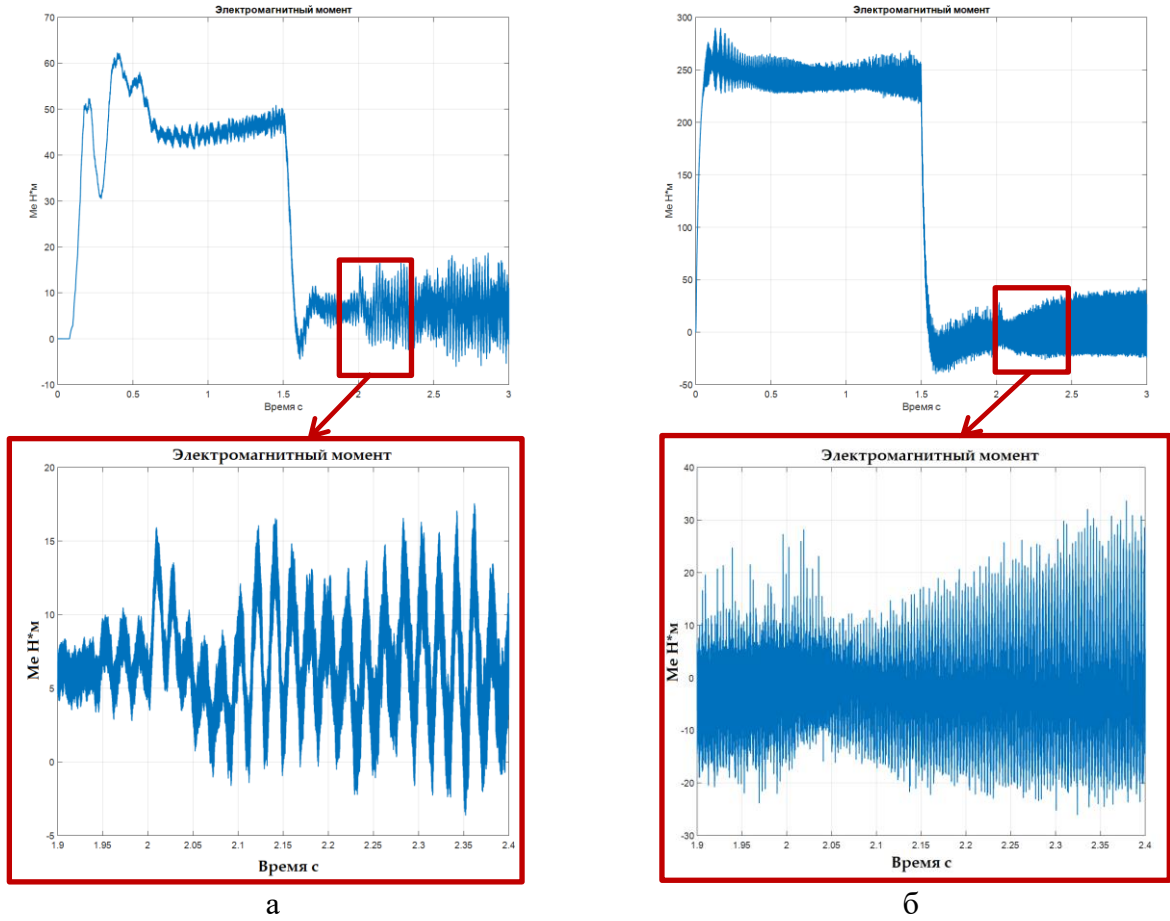


Рисунок 2.28 – Пульсации электромагнитного момента: а – ССУ замкнутая по скорости с синусоидальной ШИМ; б – ВСУ замкнутая по скорости с пространственно-векторной ШИМ

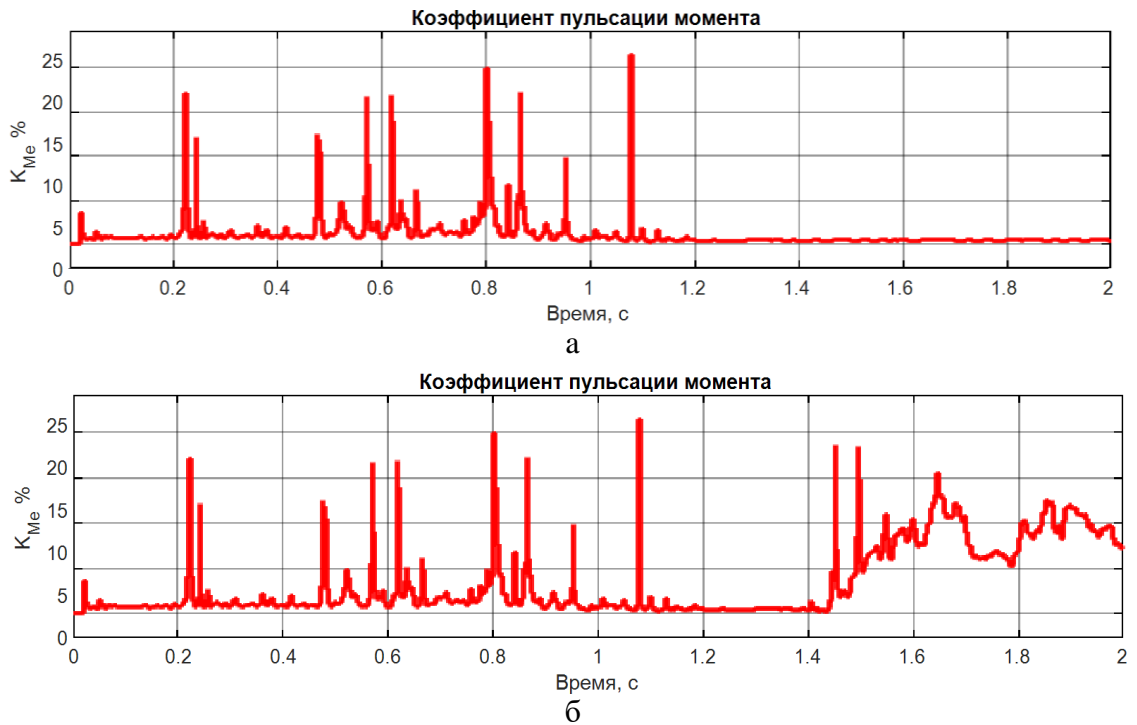


Рисунок 2.29 – Изменения коэффициента пульсаций электромагнитного момента: а – исправного АД; б – с появлением дефекта АД (пуск при $t=0-1,2$ с; проявление дефекта в момент $t=1,4$ с)

Результаты анализа коэффициента пульсаций электромагнитного момента при различных видах дефектов и конфигурациях систем управления (таблица 2.11).

Таблицы 2.11 – Суммарный коэффициент пульсаций от степени дефекта

Система управления	Дефект	$\sum K_{Me}$ при степени дефекта, %					
		0	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6	7	8
Замкнутая по скорости ССУ	МЗ	5,0	5,6	6,3	11,3	27,2	32,4
	СР		7	9,5	12,1	15,7	17,4
	ИП		6,1	8,1	10,4	11,8	12,6
	КЭ		6,2	8,3	9,8	10,1	11,7
Замкнутая по скорости ВСУ	МЗ	8,2	8,6	9,3	14,3	30,2	35,4
	СР		10	12,5	15,1	18,7	20,4
	ИП		9,1	11,1	13,4	14,8	15,6
	КЭ		9,2	11,3	12,8	13,1	14,7

Примечание: МЗ – межвитковые замыкания обмотки статора; СР – обрыв стержней ротора; ИП – износ подшипников; КЭ – комбинированный эксцентриситет.

2.5 Выводы по главе 2

1. Выполнено математическое описание частотных составляющих спектра потребляемого тока АД, соответствующих дефектам статора, ротора, подшипников и искажению магнитного поля в зазоре, подтвержденное промышленными экспериментами, выполненными на АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР».

2. Выполнен математический анализ взаимодействия гармонического состава тока и напряжения на выходе автономного инвертора напряжения с частотными составляющими, определяющими вид дефекта.

3. Обоснован и описан критерий энергоэффективности автоматизированного электропривода при возникновении дефектов АД как суммарного коэффициента искажения синусоидальности тока.

4. Обоснован и описан критерий работоспособности автоматизированного электропривода при возникновении дефектов АД как суммарного коэффициента пульсаций электромагнитного момента.

ГЛАВА 3 ГРАНИЦЫ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АЭП

3.1 Границы работоспособности АЭП

Границы устойчивого выполнения функций АЭП в части отдельных координат и характеристик, минимальный уровень которых определяется диапазоном регулирования (минимальной поддерживаемой частотой вращения ω_{e_min} и электромагнитным моментом M_{e_min}), а предельный уровень уставками реализованных защит.

Применительно к току ограничения связаны с пропускной способностью силовых ключей (*IGBT*-транзисторов) АИН. Значение тока на выходе АИН, согласно производителям [42, 51, 68], составляет 1,5-2 $i_{\text{аин_ном}}(t)$. В каждом преобразователе частоты с двухзвенной структурой НВ и АИН реализованы следующие виды защит по току:

- Защита от перегрузки или тепловая защита (*Over load*) производит отключение АД от источника питания в случае предельно-длительного $t_{\text{пред}}$ превышения номинального значения тока на выходе инвертора $i_{\text{аин_ном}}(t)$, но при этом не превышает максимально-допустимого значения $i_{\text{аин_max}}(t)$ [101]. Условие для реализации данного вида защит определяется, как (3.1).

$$I_{\text{аин_ном}} < I_{\text{аин}} < I_{\text{аин_max}}, \text{ при } t > t_{\text{пред}} = \text{const}. \quad (3.1)$$

- Максимально-токовая защита (*Over current*) производит отключение АД от источника питания при превышении выходным током инвертора $i_{\text{аин}}(t)$ максимально-допустимого значения тока $i_{\text{аин_max}}(t)$ без выдержки по времени [42, 75]. Условие для реализации данного вида защит определяется, как (3.2):

$$I_{\text{аин}} > I_{\text{аин_max}}. \quad (3.2)$$

Формирование граничных условий по току на выходе инвертора с учетом выражений (3.1-3.2) с векторным представлением токов в виде обобщённого вектора тока в системе координат-*dq* $i_s(t)$ [108, 116] имеет вид (3.3).

$$i_s(t) = i_d(t) + j \cdot i_q(t), \quad (3.3)$$

где $i_d(t)$, $i_q(t)$ – мгновенные амплитудные вещественные и мнимые части обобщённого вектора тока А, для симметричной 3-х фазной системы определяются как (3.4-3.5).

$$i_d(t) = \left[\frac{\sqrt{6}}{2} \right] \cdot i_{max} \cdot \sin(\omega t), \quad (3.4)$$

$$i_q(t) = \left[\frac{\sqrt{6}}{2} \right] \cdot i_{max} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (3.5)$$

где i_{max} – максимальное амплитудное значение тока фазы, А;

ω – частота вращения основной гармоники тока, рад/с;

t – время, с.

Для 3-х фазной ассиметричной системы (исследуемого АД) выражение мгновенных амплитудных вещественных $i_d(t)$ и мнимых $i_q(t)$ значений обобщённого вектора тока (3.6-3.7).

$$i_d(t) = \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \right] \times i_A(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \times i_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \times i_C(t), \quad (3.6)$$

$$i_q(t) = \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \times i_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \times i_C(t), \quad (3.7)$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные амплитудные значения фазных токов, потребляемых АД, А.

Приравнивая i_{max} к значениям уставок в соответствии с условиями (3.1-3.3), а также токов двигателя при допущении отсутствия выходных фильтро-компенсирующих устройств $i_S(t) = i_{аин_ном}(t)$, получим в системе координат- dq обобщённый вектор тока, потребляемого асинхронным двигателем, с зонами регулирования и действия защит (рисунок 3.1 а). При этом проявление неисправностей в виде гармонических составляющих, выделенных в главе 2 п. 2.2, привносит искажения в описываемый обобщённым вектором тока годограф. Изменения в годографе при межвитковых замыканиях (рисунок 3.1 б), обрывах стержней ротора (рисунок 3.1в), дефектах подшипников (рисунок 3.1 г) и эксцентриситете в воздушном зазоре (рисунок 3.1 д) отражает характер изменения потребляемого тока и его влияние на уставки защит, а также причины ложных срабатываний.

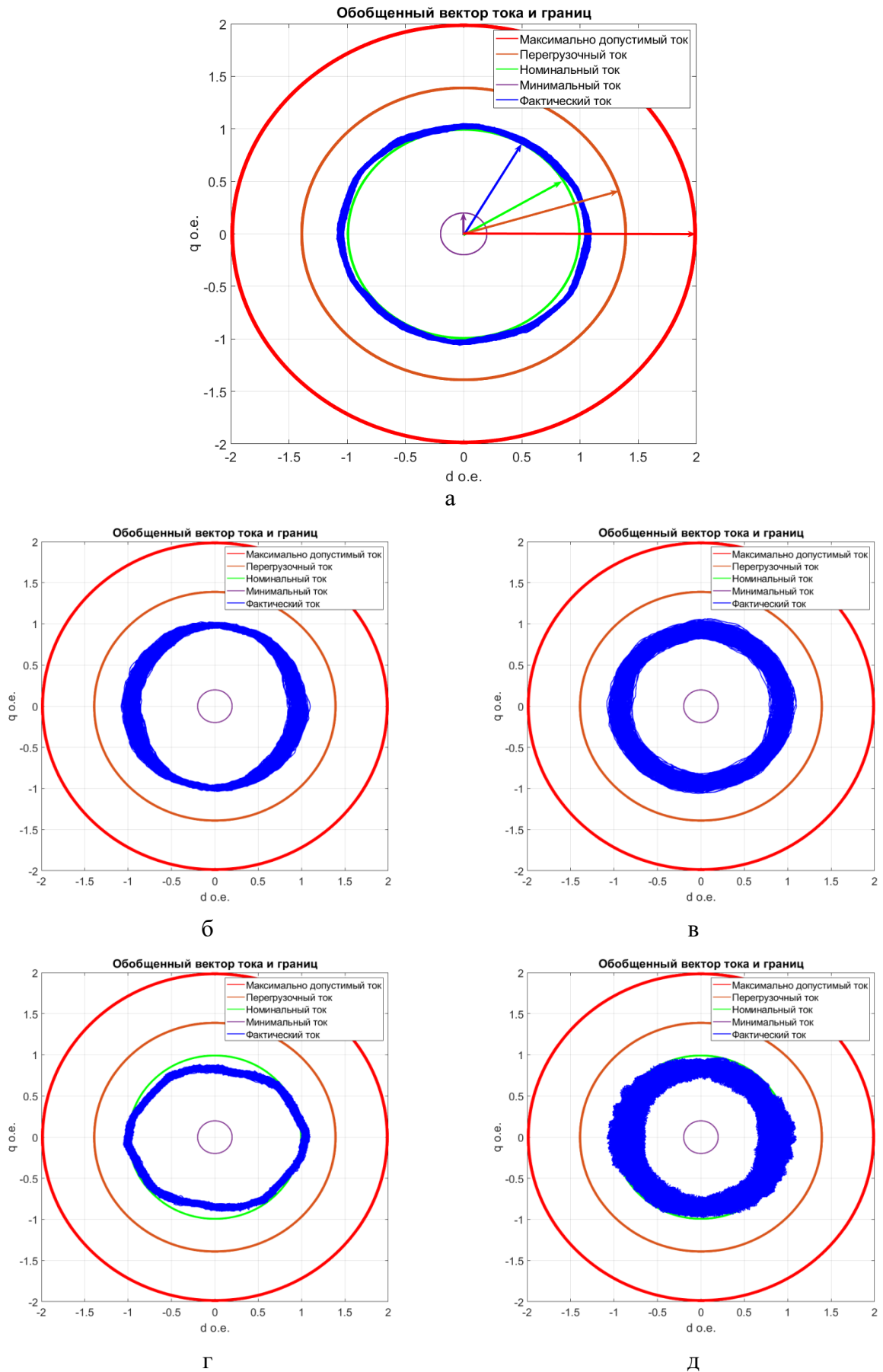


Рисунок 3.1 – Границы по току асинхронного двигателя в координатах- dq :
 а – исправный АД; б – при межвитковом замыкании; в – при обрыве стержня ротора;
 г – при износе подшипника; д – при эксцентриситете воздушного зазора.

Ток статора и электромагнитный момент определяются уровнем и гармоническим составом напряжения на выходе АИН при режимах векторной или синусоидальной модуляции. Уровень выходного напряжения инвертора $U_{\text{вых_аин}}$ [42, 64] определяется средним значением напряжения ЗПТ U_{dc} , как (3.8):

$$U_{\text{вых_аин}} = \frac{K_M \cdot U_{dc}}{2}, \quad (3.8)$$

где K_M – коэффициент модуляции о.е. ($K_M=0-1$);

U_{dc} – среднее значение напряжения на входе инвертора (напряжение ЗПТ), В;

$U_{\text{вых_аин}}$ – амплитудное значение напряжения на выходе инвертора, В.

В режимах торможения есть ограничения по накоплению или рассеиванию энергии на тормозном резисторе ЗПТ в виде тепла или при провалах напряжения, вызывающих ослабление электромагнитного поля электродвигателя. Превышение указанных ограничений приводит к физическому разрушению конденсатора ЗПТ. В целях безопасности реализуют следующие защиты по напряжению:

- Защита от повышенного напряжения в ЗПТ [101] (*Over voltage*). При торможении ИМ с высокой инерцией происходит переход АД в генераторный режим, причем генерируемая энергия меняет направление движения от АД к АИН и за счет обратных диодов в *IGBT*-транзисторах. При этом часть энергии 2-5% рассеивается на силовых элементах и тормозных резисторах до 20% [51, 113], при превышении уровня среднего значения напряжения ЗПТ U_{dc} более 20% производится отключение выхода АИН во избежание выхода из строя ПЧ.

$$U_{dc} > U_{dc_max} = 1.2 \cdot U_{dc}. \quad (3.9)$$

- Защита от пониженного напряжения в ЗПТ (*Low voltage*) [42]. Просадка напряжения на ЗПТ связана с некачественным электроснабжением (пуск оборудования высокой мощности в точке общего присоединения, обрыв фазы, ошибочное подключение). Глубина провала напряжения определяется минимально допустимым электромагнитным моментом для

движения ИМ, что в среднем для машин малой и средней мощности составляет до 40% от уровня среднего значения напряжения ЗПТ U_{dc} [42] и выражается, как (3.10):

$$U_{dc} < U_{dc_min} = 0.6 \cdot U_{dc} \cdot \quad (3.10)$$

Граничные условия по напряжению для АЭП аналогично границе по току (3.3-3.5) относительно ЗПТ в виде обобщенного вектора напряжения U_S в координатах- dq запишем как (3.11-3.13):

$$U_S(t) = u_d(t) + j \cdot u_q(t), \quad (3.11)$$

где $u_d(t)$, $u_q(t)$ – мгновенные амплитудные вещественные и мнимые части обобщенного вектора напряжения, В, для симметричной 3-х фазной системы определяются, как (3.4-3.5):

$$u_d(t) = \left[\frac{\sqrt{6}}{2} \right] \cdot u_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.12)$$

$$u_q(t) = \left[\frac{\sqrt{6}}{2} \right] \cdot u_{max} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (3.13)$$

где u_{max} – максимальное амплитудное значение фазного напряжения, В;
 ω – частота вращения основной гармоники напряжения, рад/с;
 t – время, с.

Границы допустимых минимального U_{dc_min} и максимального U_{dc_max} значений напряжения в ЗПТ с учетом фактических значений напряжения на входе и выходе инвертора в режимах как синусоидальной модуляции, так и векторной отражены на рисунке 3.2.

Из условий границы по напряжению ЗПТ формируются допустимые уровни напряжения на выходе инвертора $U_{вых_аин}$ (рисунок 3.3) при допущении что, $K_M \approx 1$ (3.14).

$$\begin{cases} U_{dc} > U_{dc_max} = 1.2 \cdot U_{dc} \\ U_{dc} < U_{dc_min} = 0.6 \cdot U_{dc} \end{cases} \Rightarrow 0.6 \cdot \frac{K_M \cdot U_{dc}}{2} > U_{вых_аин} > 1.2 \cdot \frac{K_M \cdot U_{dc}}{2} \\ \Rightarrow 0.3 \cdot U_{dc} > U_{вых_аин} > 0.6 \cdot U_{dc}. \quad (3.14)$$

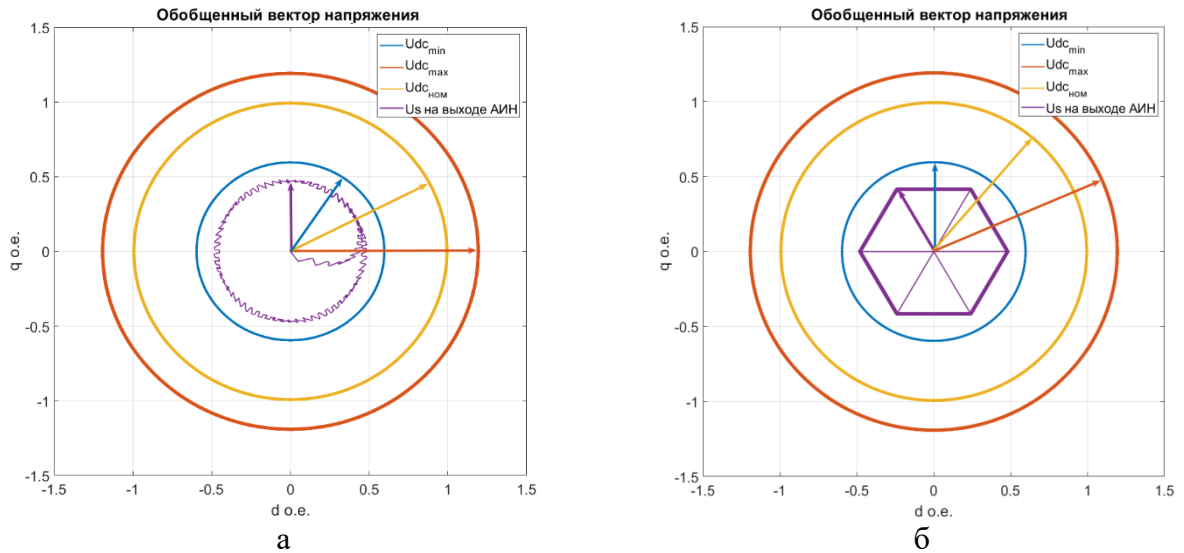


Рисунок 3.2 – Границы по напряжению в ЗПТ в координатах- dq : а – в режиме синусоидальной модуляции; б – в режиме векторной модуляции

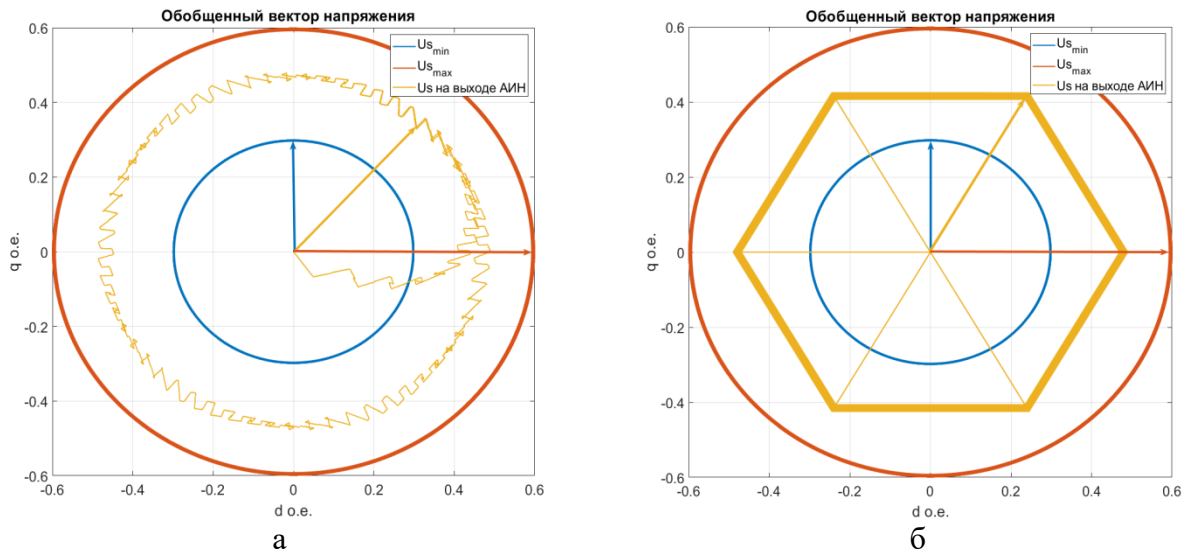


Рисунок 3.3 – Границы по напряжению на выходе АИН в координатах- dq : а – в режиме синусоидальной модуляции; б – в режиме векторной модуляции

3.2 Границы предельно-допустимого режима работы АЭП

Предельно-допустимый режим работы АЭП связан с частичной или полной потерей управления с отклонением больше допустимого значения ошибки регулируемых координат частоты вращения и момента [52, 58] в течение длительного промежутка до превышения значений уставок срабатывания защиты по току и напряжению (п.3.1).

Выход из строя АЭП до превышения порога срабатывания защит обусловлен развитием дефектов не только в части изменений характерных частотных составляющих, но и в изменении параметров схемы замещения АД. Межвитковые замыкания статора связаны с изменением его активного и

индуктивного сопротивлений. Аналогично обрыв стержней ведет к изменению активного и индуктивного сопротивлений ротора. Механические неисправности влекут за собой искажение результирующего электромагнитного поля. В итоге вид и степень дефектов электродвигателя определяют изменение параметров схемы замещения (таблица 3.1). При вариации активного и индуктивного сопротивлений статора или ротора существенного влияния на поведение систем управления и выходные характеристики АД не оказано. Однако при изменении параметров замещения статора и ротора расчетное значение индуктивности намагничивания L_m (таблица 3.1) оказывает влияние как векторную, так и скалярную СУ.

Таблица 3.1 - Изменения параметров схемы замещения при дефектах

Дефект	Параметры схемы АД	Степень дефекта, %					
		0	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6	7	8
МЗ	R_1 , Ом	0,521	0,502	0,461	0,416	0,373	0,32
	L_1 , Гн	0,145	0,141	0,123	0,109	0,091	0,89
	R_2 , Ом	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
	L_2 , Гн	0,147	0,146	0,146	0,145	0,145	0,143
	L_m , Гн	0,140	0,139	0,117	0,093	0,083	0,08
СР	R_1 , Ом	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521
	L_1 , Гн	0,145	0,145	0,144	0,144	0,144	0,143
	R_2 , Ом	0,305	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15
	L_2 , Гн	0,147	0,142	0,137	0,132	0,129	0,116
	L_m , Гн	0,140	0,138	0,132	0,127	0,12	0,11
ИП	R_1 , Ом	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521
	L_1 , Гн	0,145	0,145	0,145	0,144	0,144	0,144
	R_2 , Ом	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
	L_2 , Гн	0,147	0,147	0,147	0,146	0,146	0,145
	L_m , Гн	0,140	0,140	0,138	0,135	0,130	0,128
СЭ	R_1 , Ом	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521	0,521
	L_1 , Гн	0,145	0,145	0,145	0,144	0,144	0,144
	R_2 , Ом	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
	L_2 , Гн	0,147	0,147	0,147	0,146	0,146	0,145
	L_m , Гн	0,140	0,140	0,140	0,139	0,139	0,138

Примечание: МЗ – межвитковые замыкания обмотки статора; СР – обрыв стержней ротора; ИП – износ подшипников; СЭ – комбинированный эксцентриситет.

Оценка изменений индуктивности цепи намагничивания L_m АД при вариации параметров показывает, что при снижении более 30 % от паспортного значения наблюдается интенсивное снижение тока статора,

скольжения, коэффициента двигателя, а также рост потокосцепления ротора (рисунок 3.4).

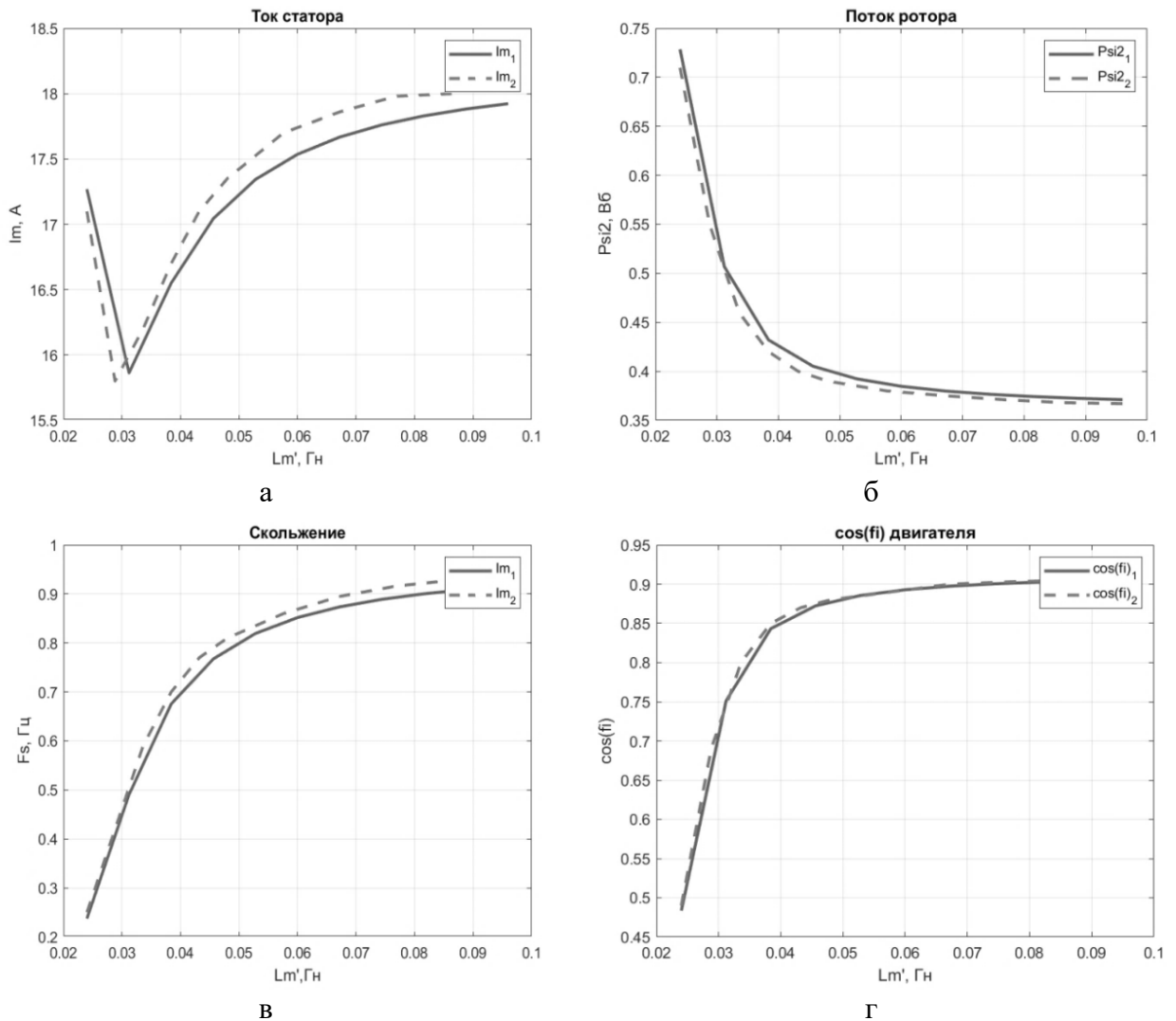


Рисунок 3.4 – Влияние индуктивности цепи намагничивания на: а – ток статора; б – поток ротора; в – скольжение; г – коэффициент мощности АД; пунктирная линия – АД№1; сплошная линия – АД№2

Анализ поведения ССУ электропривода в условиях вариации индуктивности намагничивания L_m выполнен с применением системы уравнений АД с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат [3], позволяющей произвести численное моделирование (3.15-3.26).

$$U_\alpha = R_1 \cdot I_{1\alpha} + L_{\sigma 1} \cdot \frac{dI_{1\alpha}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt}, \quad (3.15)$$

$$U_\beta = R_1 \cdot I_{1\beta} + L_{\sigma 1} \cdot \frac{dI_{1\beta}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\beta}}{dt}, \quad (3.16)$$

$$0 = R_2 \cdot I_{2\alpha} + L_{\sigma 2} \cdot \frac{dI_{2\alpha}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt} + \omega_d \cdot \Psi_{r\beta}, \quad (3.17)$$

$$0 = R_2 \cdot I_{2\beta} + L_{\sigma 2} \cdot \frac{dI_{2\beta}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\beta}}{dt} - \omega_d \cdot \Psi_{r\alpha}, \quad (3.18)$$

$$\Psi_{s\alpha} = L_{\sigma 1} \cdot I_{1\alpha} + \Psi_{m\alpha}, \quad (3.19)$$

$$\Psi_{s\beta} = L_{\sigma 1} \cdot I_{1\beta} + \Psi_{m\beta}, \quad (3.20)$$

$$\Psi_{r\alpha} = L_{\sigma 2} \cdot I_{2\alpha} + \Psi_{m\alpha}, \quad (3.21)$$

$$\Psi_{r\beta} = L_{\sigma 2} \cdot I_{2\beta} + \Psi_{m\beta} \quad (3.22)$$

$$\Psi_{m\alpha} = L_m \cdot (I_{1\alpha} + I_{2\alpha}), \quad (3.23)$$

$$\Psi_{m\beta} = L_m \cdot (I_{1\beta} + I_{2\beta}), \quad (3.24)$$

$$M_e = 1.5 \cdot z_p \cdot (\Psi_{r\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{r\beta} \cdot I_{1\alpha}), \quad (3.25)$$

$$\omega_r = \int \frac{M_d - M_c}{J_d} \cdot dt, \quad (3.26)$$

где U_α, U_β – напряжения статора, В;

$I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ – токи статора, А;

$I_{2\alpha}, I_{2\beta}$ – токи ротора, А;

$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ – потоки статора, Вб;

$\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – потоки ротора, Вб;

$\Psi_{m\alpha}, \Psi_{m\beta}$ – потоки намагничивания, Вб;

R_1, R_2 – активное сопротивление статора и ротора, Ом;

$L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн;

L_m – индуктивность намагничивания, Гн;

M_e – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления нагрузки, Н·м;

J_d – момент инерции вала, кг·м²;

ω_r , – частота вращения ротора, рад/с.

Численное моделирование при изменении индуктивности намагничивания в пределах 0,8-1,2 L_m от номинального при пуске под нагрузкой, набросе/сбросе нагрузки на 30% и 50% (рисунок 3.5) в замкнутой по частоте вращения ССУ не обеспечивается поддержание скорости и момента электродвигателя при $L_{m1} \leq 0,92 L_m$ с кратковременной 50% перегрузкой, при $L_{m2} \leq 0,85 L_m$ и кратковременной 30% перегрузкой. Снижение $L_{m3} \leq 0,8 L_m$ не позволяет произвести пуск электродвигателя.

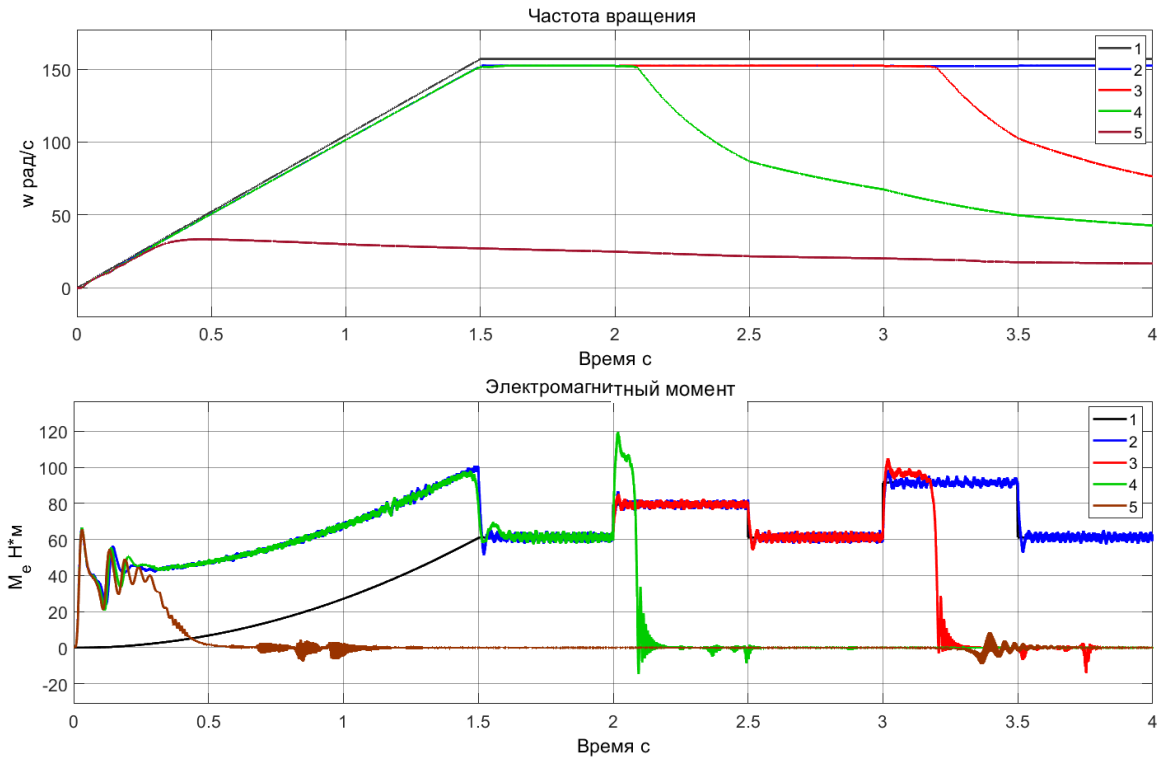


Рисунок 3.5 – Частота вращения ротора и электромагнитный момент на валу: 1 – задание по частоте и моменту сопротивления; 2 - при $1,0 L_m$; 3 - при $0,92 L_m$; 4 - при $0,85 L_m$; 5 - при $0,8 L_m$

По результатам численного моделирования и анализа параметров схемы замещения таблицы 3.2 выделим $L_{m_min} = 0,8 L_m$ и соответствующие L_1, L_2, R_1, R_2 , по которым определяем максимальные амплитуды тока I_{dij} частотных составляющих дефектов (таблица 3.2), с расчетом производных и учетом коэффициентов модуляции k_{mjk} , на основе которых строим граничную область (рисунок 3.6).

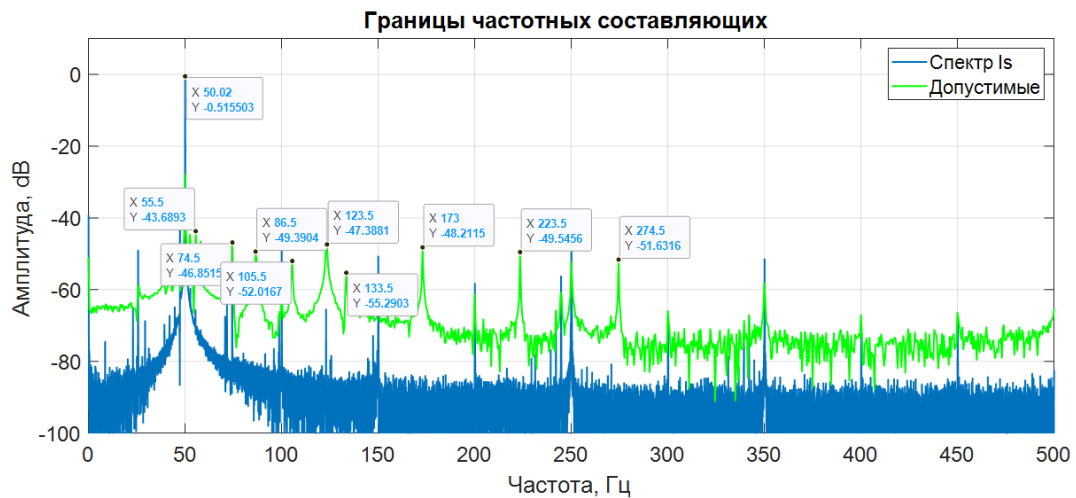


Рисунок 3.6 – Границы предельно-допустимых значений амплитуд частотных составляющих АЭП со ССУ

Таблица 3.2 – Предельно-допустимые значения амплитуд характерных частот в ССУ

Узел	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Предельно-допустимое значение A , Дб
1	2	3	4	5
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-30,0
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-50,6
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-26,2 -30,2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	х
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-24,2 -24,7
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-43,6 -44,7
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-36,0
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-40,4
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-32,5

Для анализа поведения векторной системы управления используем уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат при ориентации системы координат по потоку ротора [3], имеющие вид (3.27-3.32):

$$I_d = \left(U_d - \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{d\Psi_r}{dt} + \sigma \cdot L_1 \cdot \omega_s \cdot I_q \right) \cdot \frac{R_1^{-1}}{\sigma \cdot L_1 \cdot p + 1}, \quad (3.27)$$

$$I_q = \left(U_q - \frac{L_m}{L_2} \cdot \omega_s \cdot \Psi_r - \sigma \cdot L_1 \cdot \omega_s \cdot I_d \right) \cdot \frac{R_1^{-1}}{\sigma \cdot L_1 \cdot p + 1}, \quad (3.28)$$

$$\Psi_r = \frac{L_m}{L_2 \cdot s + 1} \cdot I_d, \quad (3.29)$$

$$\omega_s = R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{I_q}{\Psi_r}, \quad (3.30)$$

$$M_e = 1.5 \cdot p \cdot \Psi_r \cdot I_q, \quad (3.31)$$

$$\omega_r = \int \frac{(M_d - M_c)}{J_d} \cdot dt, \quad (3.32)$$

где p – оператор Лапласа;

I_d, I_q, U_d, U_q – токи и напряжения статора во вращающейся системе dq координат, А, В;

L_1, L_2 – индуктивность статора и ротора, Гн;

ω_s – частота скольжения, рад/с;

Ψ_r – поток ротора, Вб;

σ – коэффициент рассеяния, о.е.

Моделирование осуществилось при изменении индуктивности намагничивания в пределах $0,9-1,1 \cdot L_m$ от номинального при пуске под нагрузкой, набросе/сбросе нагрузки на 100% и 200% (рисунок 3.7) в замкнутой по частоте вращения векторной системе управления при ориентации по вектору потокосцепления ротора [15]. В пусковые моменты при $L_{m1} \leq 0,95 \cdot L_m$ или $L_{m3} \geq 1,05 \cdot L_m$ не поддерживается частота вращения и момент электродвигателя, а в номинальных режимах при однократном и двукратном набросе/сбросе нагрузки увеличивается амплитуда пульсаций электромагнитного момента.

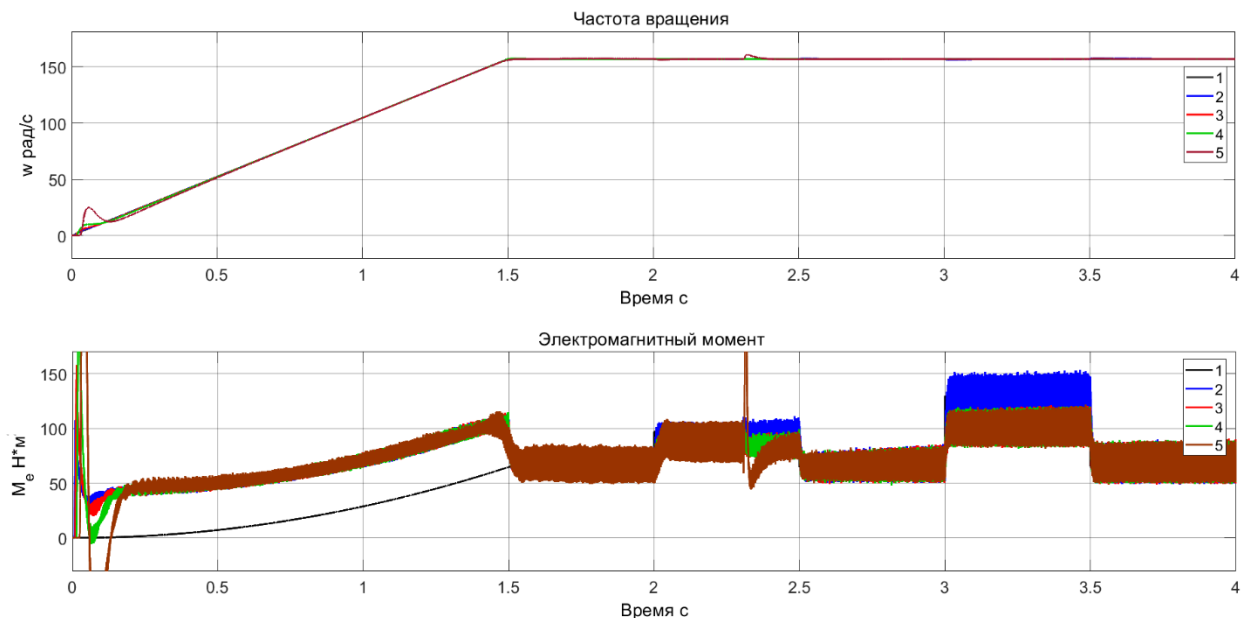


Рисунок 3.7 – Частота вращения ротора и электромагнитный момент на валу: 1 – задание по частоте и моменту сопротивления; 2 - при $1,0 L_m$; 3 - при $0,97 L_m$; 4 - при $0,95 L_m$; 5 - при $1,05 L_m$

При этом поддержание частоты вращения и электромагнитного момента достигается за счет контуров регулирования потокосцепления ротора, проекций I_d и I_q обобщенного вектора тока. Точность регулирования

в условиях вариации L_m поддерживается за счет повышения напряжения ЗПТ (рисунок 3.8). Ограничение L_m определяется допустимым уровнем напряжения на ЗПТ.

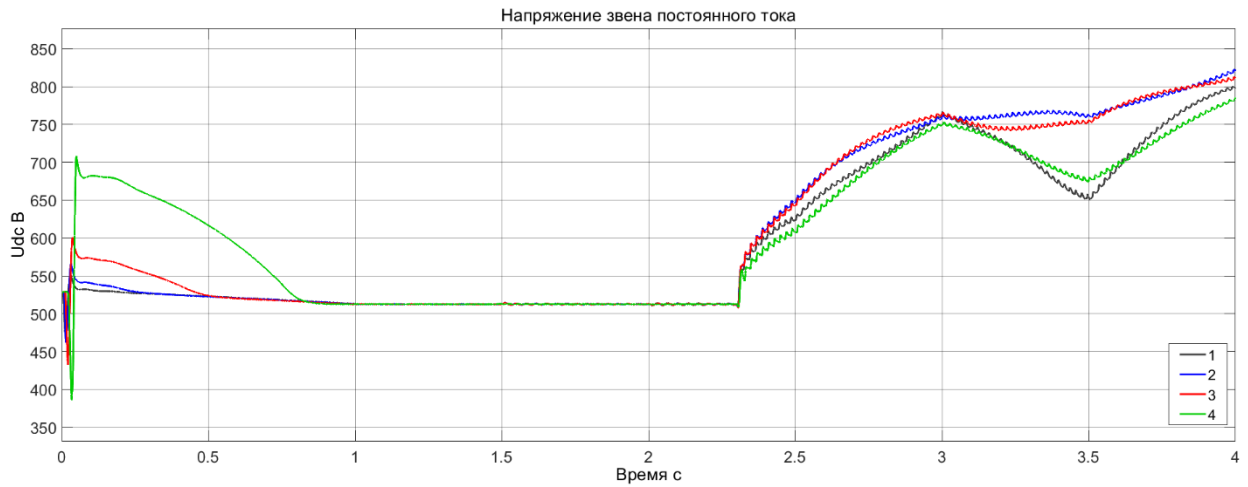


Рисунок 3.8 – Частота вращения ротора и электромагнитный момент на валу: 1 - при $1,0 L_m$; 2 - при $0,97 L_m$; 3 - при $0,95 L_m$; 4 - при $1,05 L_m$

По результатам численного моделирования и анализа параметров схемы замещения таблицы 3.2 выделим $0,95L_{m1} \leq L_{m_min} \leq 1,05L_m$ соответствующие L_1, L_2, R_1, R_2 , по которым определяем максимальные амплитуды тока I_{dij} частотных составляющих дефектов (таблица 3.3), с расчетом производных с учетом коэффициентов модуляции k_{mjk} , на основе которых строим граничную область (рисунок 3.9).

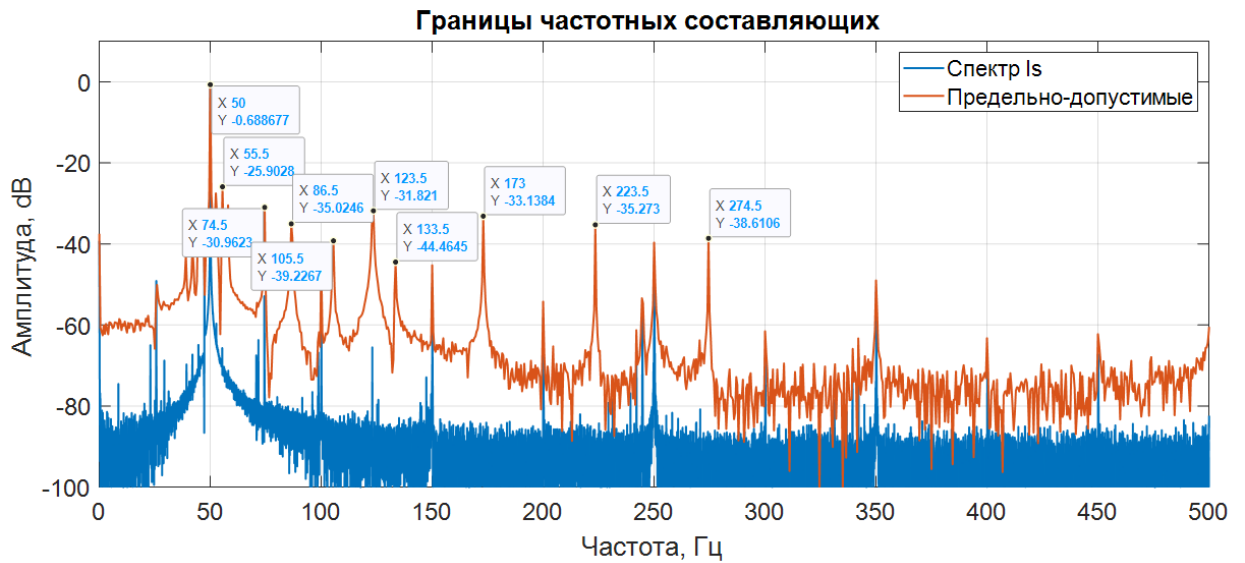


Рисунок 3.9 – Границы предельно-допустимых значений амплитуд частотных составляющих АЭП с векторной СУ

Превышение граничных значений для ССУ и ВСУ введет к повышению потребляемой активной мощности с последующей потерей управления и, как следствие, к срабатыванию защит (п. 3.1).

Таблица 3.3 – Предельно-допустимые значения амплитуд характерных частот в ВСУ

Узел	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Предельно-допустимое значение A , Дб
1	2	3	4	5
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-36,0
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-60,7
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-31,4 -36,2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	х
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-29,0 -29,6
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-52,3 -53,6
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-43,2
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-48,5
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-39,0

3.3 Границы допустимого режима работы АЭП

Проявление дефектов АД электропривода, во-первых, обусловлено изменением параметров схемы замещения, что вызывает рассогласование в контурах регулирования в продолжительных режимах работы. В ССУ отсутствие контура регулирования тока приводит к росту и искажениям его формы при поддержании заданной частоты вращения за счет повышения напряжения на ЗПТ (рисунок 3.10). В ВСУ за счет контуров регулирования тока статора искажается его форма и поддерживается амплитуда, при этом в связи с развитием дефекта нарастает рассогласование координат и работа регуляторов становится некорректной (рисунок 3.11). Во-вторых,

обусловлено повышением напряжения на ЗПТ при источнике неограниченной мощности либо ослаблением поля АД и, как следствие, снижением максимального момента при ограниченном источнике питания.

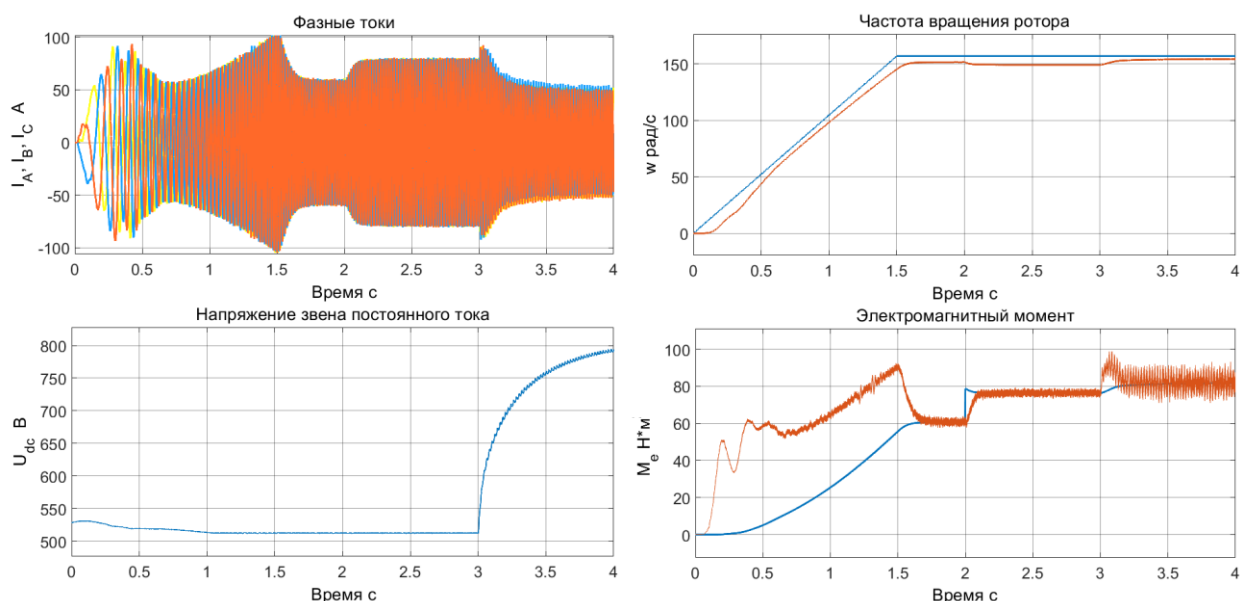


Рисунок 3.10 – Осциллограммы АЭП с ССУ при эквивалентном межвитковом замыкании

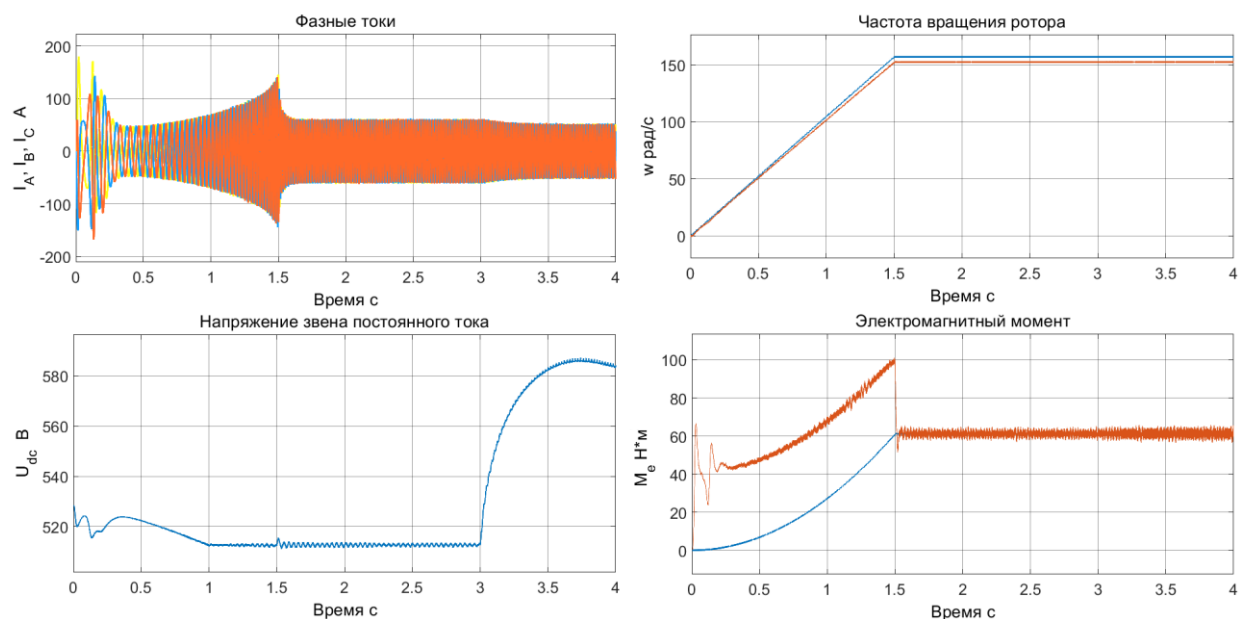


Рисунок 3.11 – Осциллограммы АЭП с ВСУ при эквивалентном межвитковом замыкании

Исходя из требований по точности и диапазону регулирования координат к ССУ [41, 65, 66] или ВСУ [13, 14, 15] для замкнутых по частоте вращения с датчиком скорости (таблица 3.4), допустимый режим работы АЭП связан с незначительным отклонением (1-2%) регулируемых координат частоты вращения и момента от допустимого значения ошибки, вызванной неисправностями в АД. Однократное превышение отклонений регулируемых

координат от требуемых сопровождается повышенным потреблением и пульсациями активной мощности (п. 2.3) ввиду изложенных причин выше.

Таблица 3.4 – Требования к системам управления АЭП

Критерий	Система управления	
	Скалярная	Векторная
1	2	3
Диапазон регулирования	1:40	1:1000
Точность по частоте вращения ω_p	$\pm 1-5\%$	$\pm 1,5\%$
Точность по моменту вращения $M_{вр}$	косвенно регулируется	$\pm 0,1-0,5\%$

В ССУ отклонение частоты вращения до $\pm 10\%$, вызванное дефектами в АД, помимо повышенного энергопотребления при поддержании выходных координат сопровождается ростом амплитуды пульсаций электромагнитного момента. Исходя из условий (таблица 3.4), рассчитываются максимальные амплитуды тока I_{dij} частотных составляющих дефектов (таблица 3.5), с расчетом производных с учетом коэффициентов модуляции k_{mjk} , на основе которых строим допустимую область (рисунок 3.12).

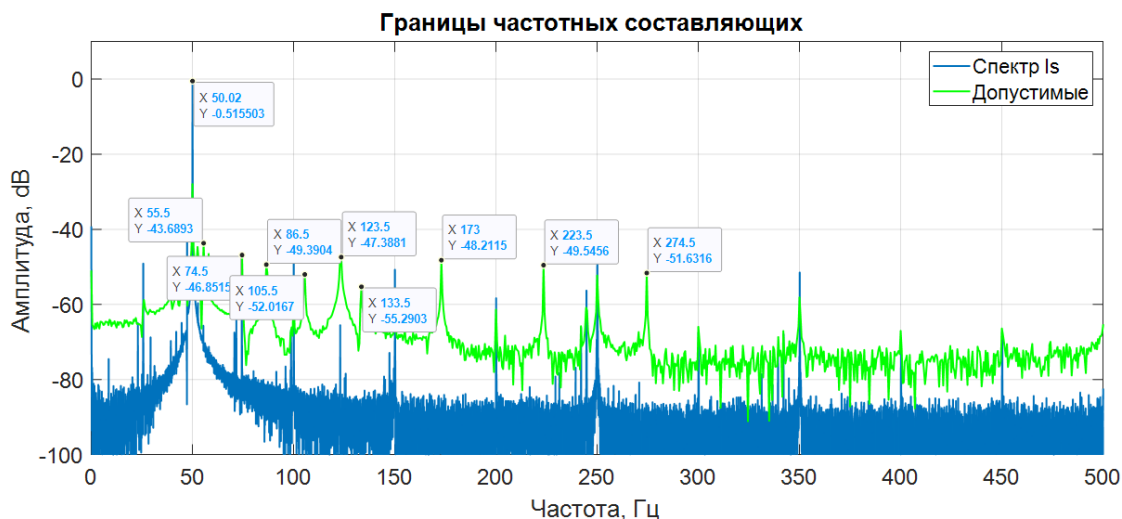


Рисунок 3.12 – Границы допустимых значений амплитуд частотных составляющих АЭП с ССУ

Для ВСУ отклонение частоты вращения более чем на $\pm 3\%$ и/или электромагнитного момента $\pm 1\%$ обусловлено рассогласованием и некорректной работой регулирующих устройств, выражено в повышении потребления активной мощности либо в ослаблении электромагнитного поля АД, и ведет к снижению максимального электромагнитного момента.

Таблица 3.5 – Допустимые значения амплитуд характерных частот в ССУ

Узел	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Допустимое значение A , Дб
1	2	3	4	5
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-46,8
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-63,0
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-44,6 -47,7
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	x
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-43,2 -43,5
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-62,4 -63,1
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	52,0
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-55,3
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-49,4

Аналогично рассчитываются максимальные амплитуды тока I_{dij} и их составляющие (таблица 3.6, рисунок 3.13).

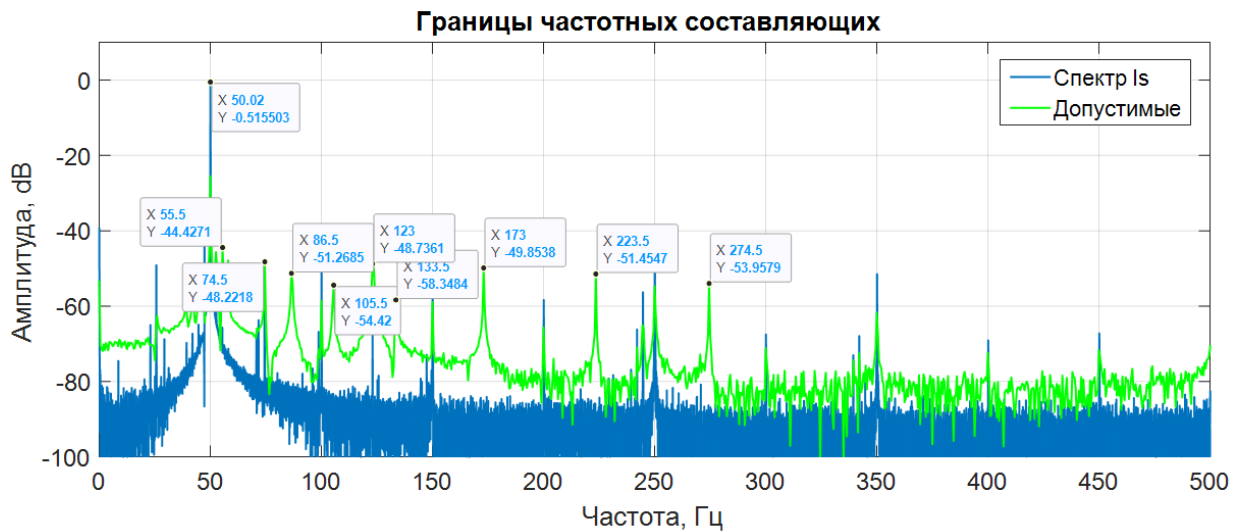


Рисунок 3.13 – Границы допустимых значений амплитуд частотных составляющих АЭП с ВСУ

Таблица 3.6 – Допустимые значения амплитуд характерных частот в ВСУ

Узел	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Допустимое значение A , Дб
1	2	3	4	5
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-56,2
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-75,6
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-53,5 -57,2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	x
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-51,8 -52,2
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-74,9 -75,7
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-62,4
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-66,4
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-59,3

С целью поддержания энергетических и механических характеристик АЭП требуется при изменении параметров схемы замещения, вызванного дефектами, без возможности автоподстройки регулирующих устройств (*Autotune*) косвенно вычислять параметры средствами программных наблюдателей в части определения индуктивности цепи намагничивания с реализацией алгоритмов коррекции регуляторов или алгоритмов упреждающего управления.

3.4 Оптимальная область работоспособности АЭП

Изменения амплитуд частотных составляющих $A(f_{dij})$, соответствующих нормальному состоянию АД при заданном диапазоне регулирования, ограничены допустимыми значениями амплитуд частотных составляющих (таблица 3.6) и порогом их обнаружения (п.2.2). С учетом всех условий границ частотных составляющих, характеризующих дефекты АД по спектру потребляемого тока, формируем границы (рисунок 3.14). Полный

состав амплитудных значений частот, соответствующих дефектам, приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А.

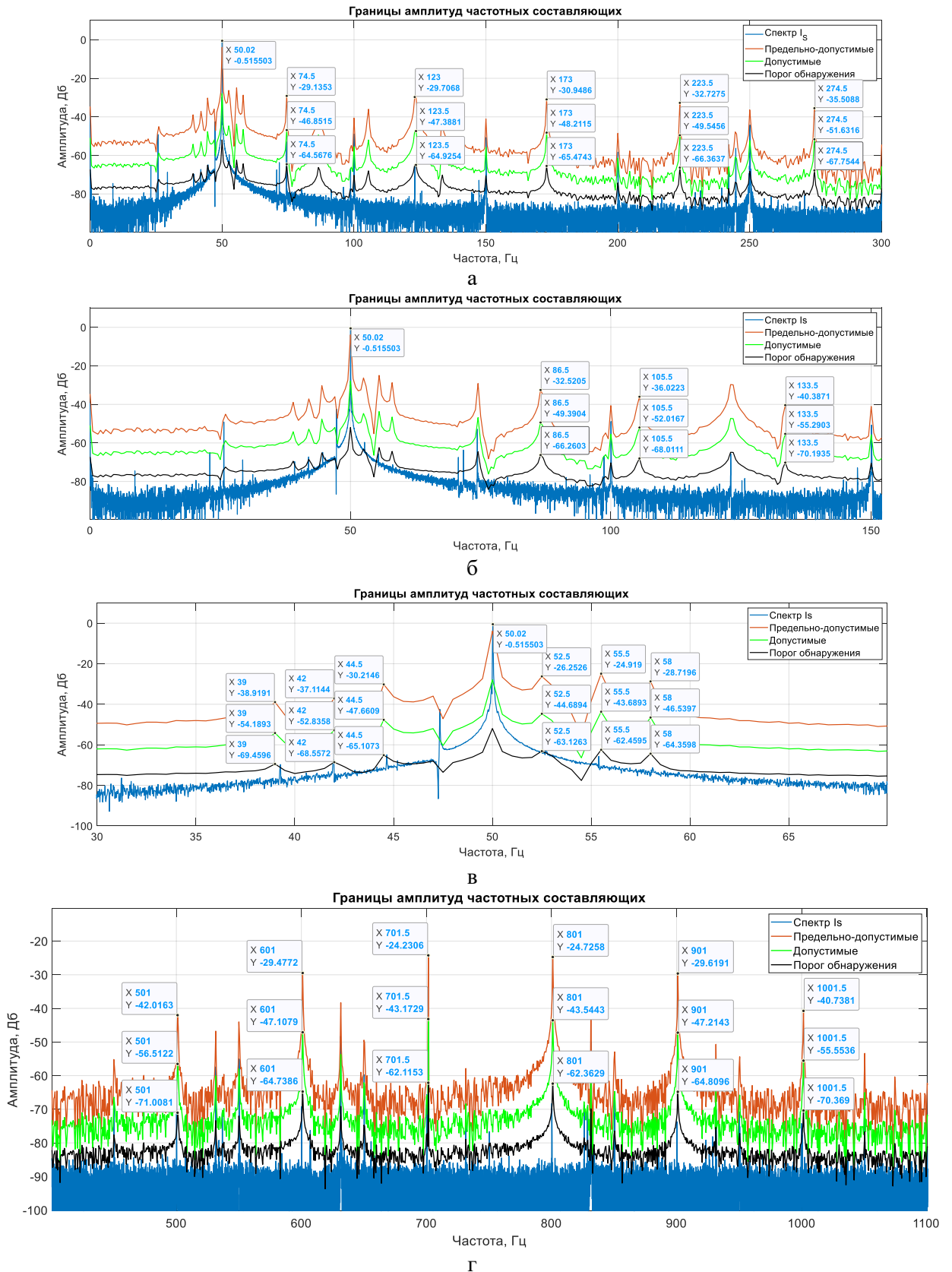


Рисунок 3.14 – Границы частотных составляющих, характеризующих дефекты АД:
 а – при межвитковых замыканиях и асимметрии статора; б – при износе подшипников;
 в – при обрыве стержней ротора; г – эксцентриситете

Таблица 3.7 – Значения амплитуд характерных частот в ССУ

Узел	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Порог обнаружения A , Дб	Предельное значение A , Дб	Предельно-допустимое значение A , Дб	Допустимое значение A , Дб	Диапазон ошибки частоты Δf_d Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	- 64,0	-29,0	-30,0	-46,8	±0,8
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-75,0	-45,0	-50,6	-63,0	±0,4
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	- 63,1 - 65,1	-25,0	-26,2 -30,2	-44,6 -47,7	±1,2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	-57,0	х	х	х	х
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-62,1 -62,3	-23,0 -23,0	-24,2 -24,7	-43,2 -43,5	±1,5
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-70,2 -66,9	-24,0 -26,6	-43,6 -44,7	-62,4 -63,1	±1,5
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-68,0	-35,0	-36,0	-52,0	±0,5
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-70,2	-39,0	-40,4	-55,3	±0,5
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-69,1	-31,0	-32,5	-49,4	±0,5

В соответствии с таблицей 3.7, по выявленным пороговым значениям и учетом критериев энергоэффективности K_I и работоспособности $\sum K_{Me}$ на заданном диапазоне регулирования частоты вращения ω_r , строится оптимальная область работоспособности АЭП (рисунок 3.15) в виде поверхности δ (3.33).

$$\delta = f(\omega_r, K_I, \sum K_{Me}), \quad (3.33)$$

Вектор $D_i = f(\omega_r, K_I, \sum K_{Me})$ отображает техническое состояние исследуемого АЭП на всем диапазоне регулирования. При этом координаты вектора D_i под поверхностью δ и принадлежащие ей соответствуют устойчивому состоянию АЭП по энергетическим и механическим показателям. Таким образом, возможно непрерывно отслеживать эффективность регулирования ЭП в соответствии с техническим состоянием АД.

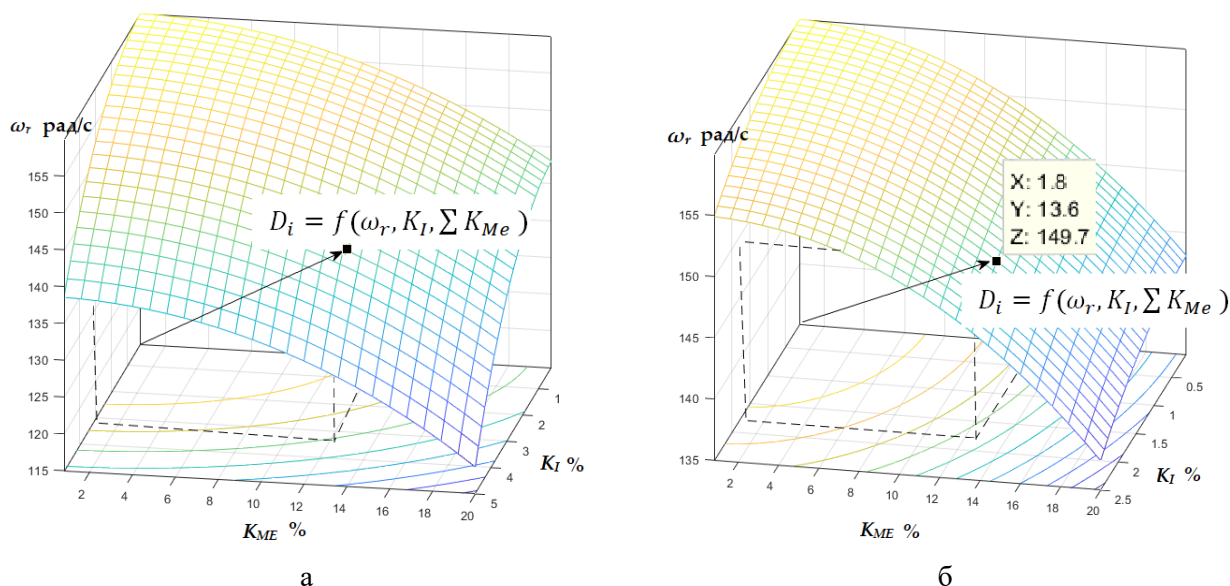


Рисунок 3.15 – Оптимальная область работоспособности АЭП: а – общий вид; б – фактическая область

3.5 Выводы по главе 3

1. Определены и обоснованы границы работоспособного состояния с учетом реализованных защит по току и напряжению в автоматизированном электроприводе.
2. Определены и обоснованы границы предельно-допустимого режима работы АЭП со скалярными и векторными алгоритмами управления, соответствующие критическим изменениям параметров схемы замещения АД, при которых нарушается устойчивая работа АЭП.
3. В соответствии с требованиями к качеству и точности регулирования скалярных и векторных систем управления, определены допустимые границы изменения параметров схемы замещения, связанных с дефектами в АД и искажениями в сигналах токов.

4. В соответствии со всеми граничными условиями определены и рассчитаны пороговые амплитудные значения частотных составляющих, характеризующие дефекты АД при питании от АИН. Пороговые значения позволяют оценить вид, уровень дефекта и общее техническое состояние с определением критериев энергоэффективности и работоспособности.

5. Теоретически описана область оптимальной работоспособности АЭП, определяющая устойчивую работу в части энергетических и механических критериев на всем диапазоне регулирования частоты вращения.

6. Исследование косвенного вычисления фактического значения индуктивности цепи намагничивания в продолжительных режимах работы электропривода с последующей разработкой средств коррекции системы управления с различными алгоритмами управления является актуальной задачей.

ГЛАВА 4 СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АЭП

4.1 Структура системы контроля технического состояния

Автоматизированный электропривод (рисунок 4.1) является многокомпонентным ЭТК, в состав которого входят электрические, электромеханические и механические преобразователи, являющиеся также сложными системами. В диссертационной работе рассматривается техническое состояние АЭП с учетом износа и/или дефектов АД, при этом принимаем, что состояния ИМ и ПЧ остаются эталонными и неизменными. Механические системы привода [49] и силовые ПЧ [17] обладают собственными системами диагностики.

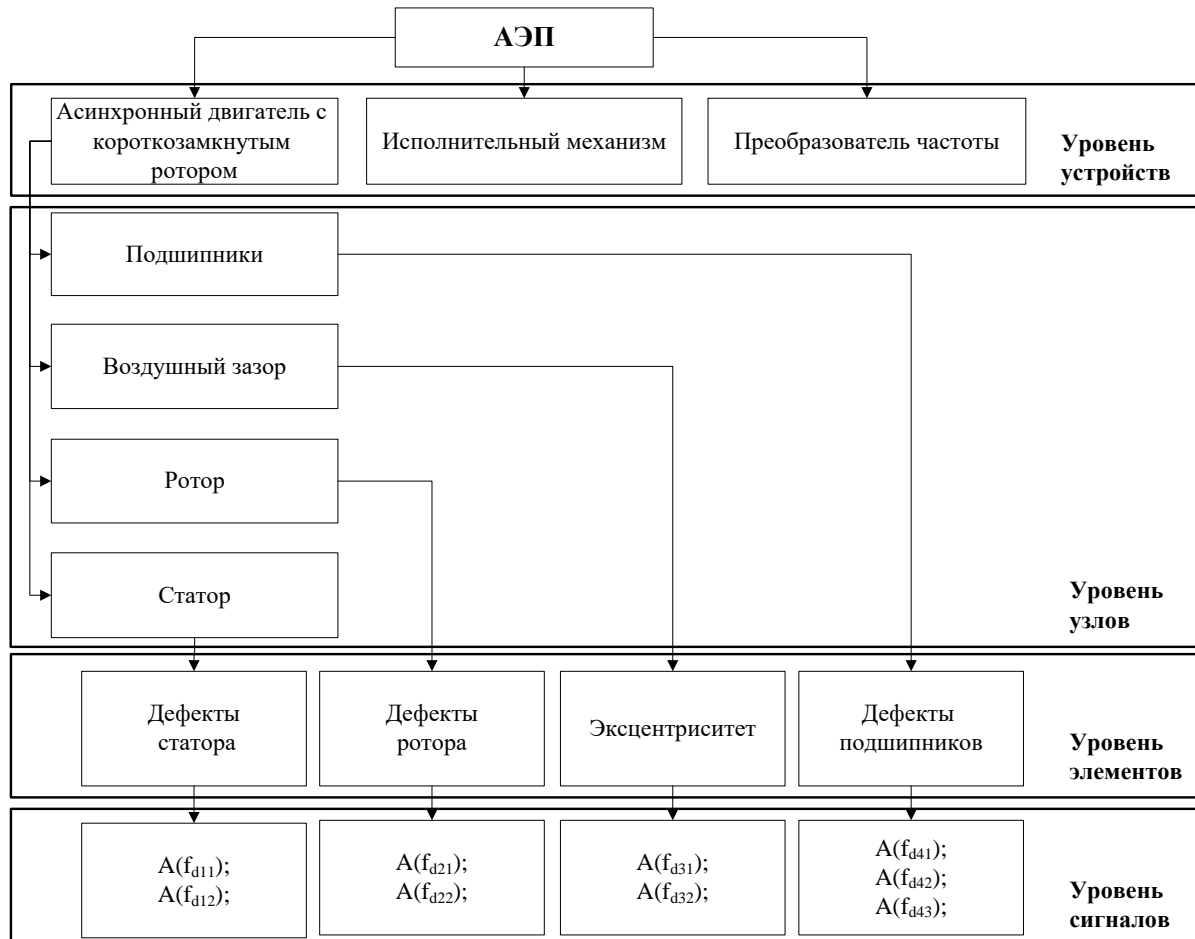


Рисунок 4.1 – Структурно-функциональная схема

Данная структурно-функциональная схема оценки технического состояния АЭП состоит из 4-х уровней диагностирования:

1. Уровень сигналов – регистрация отклонений в сигналах тока и напряжения АД при проявлении дефектов в виде годографов, тем самым, исключая изменения в сигналах, связанные с коммутационными процессами и изменением в нагрузки.
2. Уровень элементов – определяется по спектральному анализу тока с оценкой вида и уровня неисправности конкретного элемента в узле (глава 2), (на примере подшипника как узла, состоящего из элементов в виде внешнего, внутреннего колец и тел качения).
3. Уровень узлов определяется с учетом конструкции асинхронного двигателя, включающей основные узлы (статор, ротор, подшипники), по совокупному состоянию соответствующих элементов. Совокупность дефектов в узлах и их уровень оценивается с учетом их влияния на энергоэффективность K_I и работоспособность $\sum K_{Me}$ АЭП.
4. Уровень устройств оценивается на основе состояний основных устройств (АД, ПЧ, ИМ) и их влияния на работоспособность и энергоэффективность АЭП. С учетом принятых допущений, что состояния ПЧ и ИМ остаются исправными и постоянными, техническое состояние АД определяет состояние АЭП.

4.2 Алгоритмы оценки технического состояния электропривода

С учетом предложенной структуры (рисунок 4.1) на каждом из уровней реализован алгоритм оценки состояний.

Уровень сигналов является важным компонентом, определяющим момент времени зарождения дефекта и скорость его развития на начальных этапах. При этом решение задачи мониторинга и минимизации обрабатываемых и хранящихся данных решается при помощи обобщённого вектора тока (2.28), поскольку при дефектах искажения наводятся только в сигнале тока без изменений сигнала напряжения (рисунок 4.2).

Данный алгоритм реализуется в два этапа. Первый этап заключается в сравнении траектории годографа за один период с предыдущей и расчётом расхождения в виде (рисунок 4.3 а).

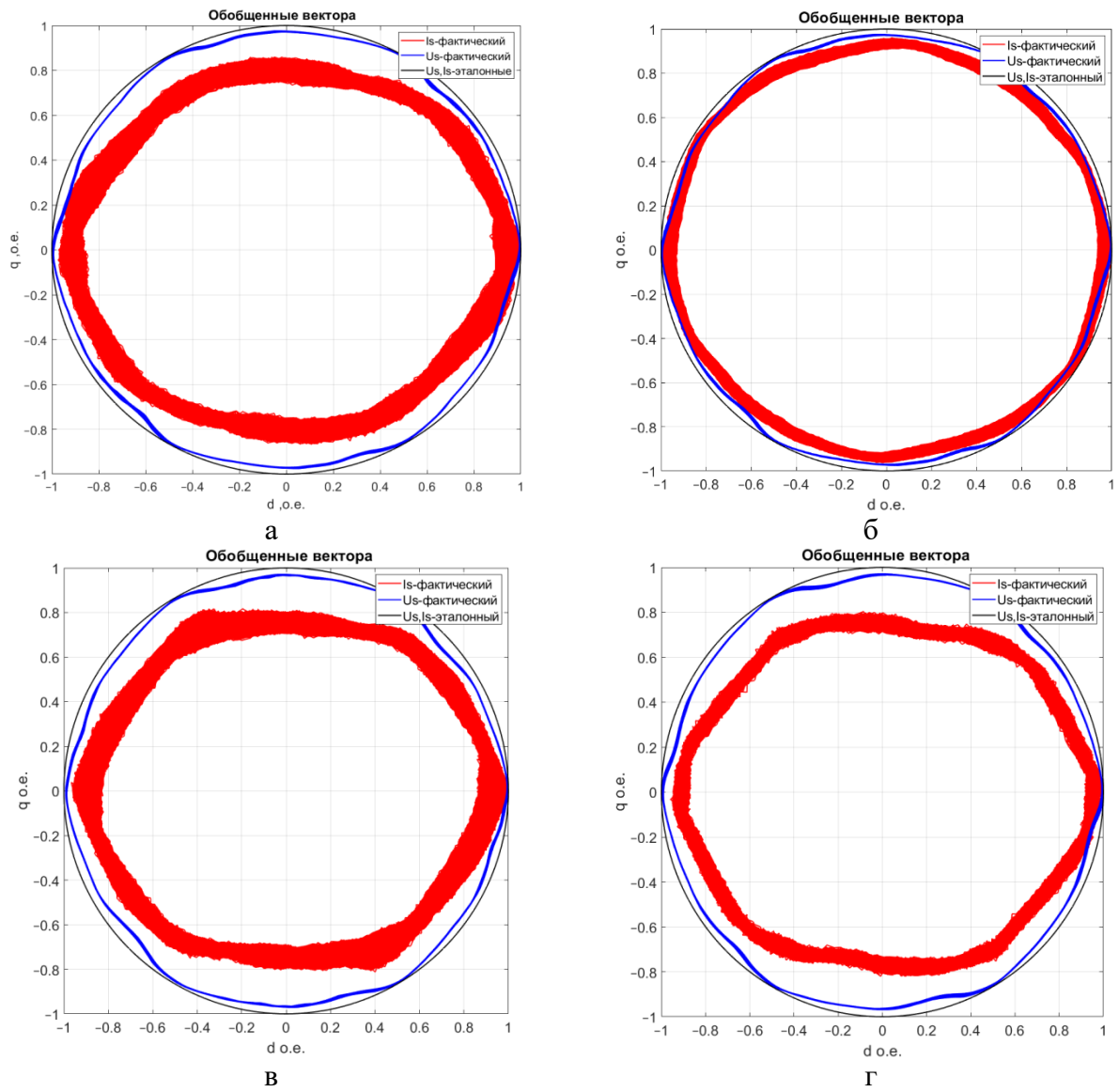


Рисунок 4.2 – Годографы обобщенного вектора тока и напряжения в координатах dq при развитии износа внутреннего кольца подшипника: а – исправный АД в режиме холостого хода; б – исправный АД в номинальном режиме; в – 1 раковина в подшипнике; г – 3 раковины в подшипнике

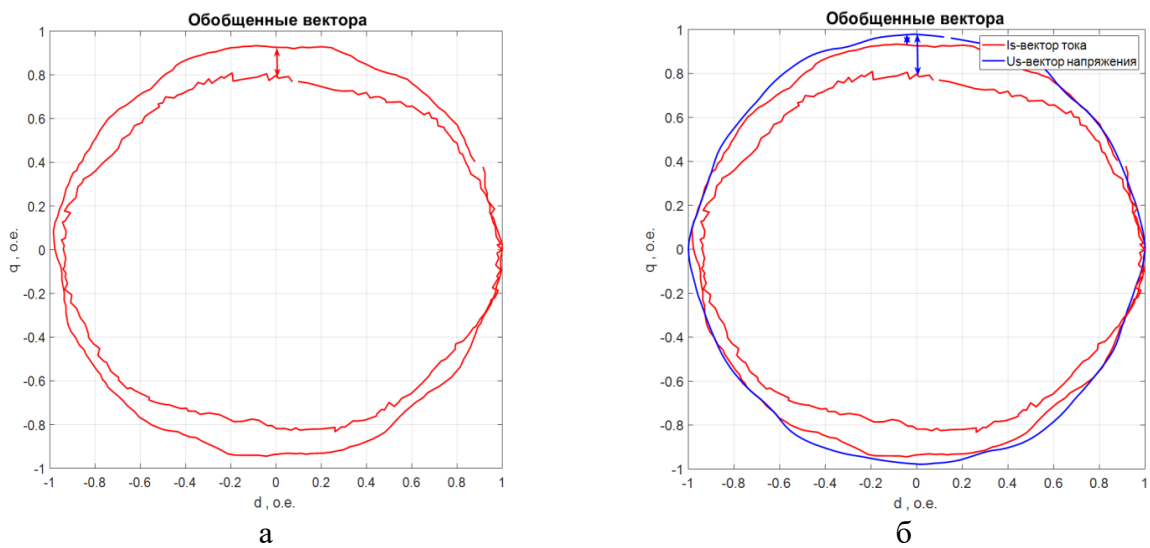


Рисунок 4.3 – Девиация годографа тока (а), годографа тока относительно напряжения (б)

На втором этапе рассчитанное отклонение в токе сопоставляется с годографом обобщённого вектора напряжения и с границами п.3.1-3.3 (рисунок 4.3 б).

Согласно алгоритму (рисунок 4.4) на каждом периоде измерений сравниваются отклонения обобщённого вектора тока и напряжения. Изменения в форме годографа тока при постоянстве годографа напряжения определены как результат проявления дефекта (п. 2.1). В других вариантах соотношений отклонений годографов тока и напряжения связаны с регулированием, изменением режима работы либо нормальной работой. В результате обнаружения дефектов завершается алгоритм, после чего производится переход на уровень диагностики элементов со спектральным анализом тока.

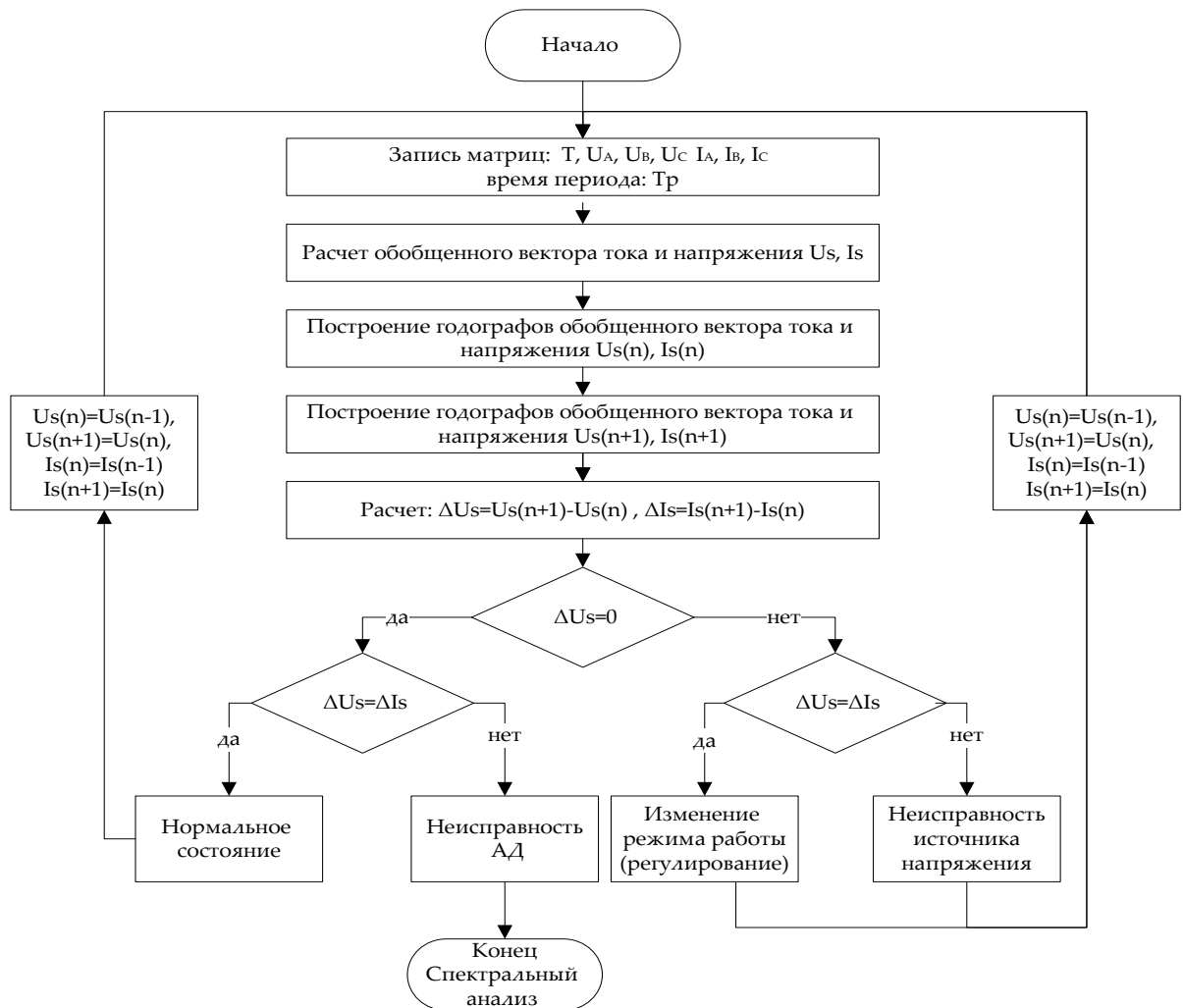


Рисунок 4.4 – Алгоритм поиска дефектов АД

Уровень элементов реализуется по алгоритму поиска и оценке амплитудных значений частотных составляющих в спектре потребляемого тока АД (рисунок 2.20) в соответствии с п. 2.1 и п. 3.4.

В состав диагностируемых элементов входят:

- межвитковые замыкания в обмотках статора;
- асимметрия статора;
- обрыв стержней ротора;
- асимметрия ротора;
- статический эксцентриситет воздушного зазора;
- динамический эксцентриситет воздушного зазора;
- тела качения подшипника;
- внутреннее кольцо подшипника;
- внешнее кольцо подшипника.

Количественная оценка дефекта производится как:

$$K_{dij} = \frac{I_{dij}}{I_{ст_max}}, \quad (4.1)$$

где $I_{ст_max}$ – максимально допустимое амплитудное значение фазного тока на выходе инвертора;

I_{dij} – амплитудные значения гармонических составляющих тока, формируемые при дефектах АД;

$i = \overline{1, n}$; n – количество диагностируемых узлов;

$j = \overline{1, m}$; m – количество неисправностей в узле.

Результаты оценки состояния элементов в узлах АД представлены в виде диагностических карт (рисунки 4.5-4.7), отражающих совокупное фактическое состояние.

Уровень узлов асинхронной машины путем объединения состояний элементов в виде:

- статора K_{d1j} ;
- ротора K_{d2j} ;
- эксцентриситета в воздушном зазоре K_{d3j} ;

- подшипников K_{d4j} .



Рисунок 4.5 – Диаграмма технического состояния: а – нормальное состояние агрегата



Рисунок 4.6 – Диаграмма технического состояния: с допустимым уровнем неисправностей



В

Рисунок 4.7 – Диаграмма технического состояния: неисправное состояние

Расчет состояний узлов выполнен как:

$$K_{d1j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d1j}}{I_{ст_max}} \quad (4.2)$$

$$K_{d2j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d2j}}{I_{ст_max}} \quad (4.3)$$

$$K_{d3j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d3j}}{I_{ст_max}} \quad (4.4)$$

$$K_{d4j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d4j}}{I_{ст_max}} \quad (4.5)$$

Уровень устройств представлен преобразователем частоты, асинхронным двигателем и исполнительным механизмом, определяющими техническое состояние АЭП. При принятых допущениях, что ПЧ и ИМ остаются в неизменном состоянии, оценка технического состояния АЭП состоит в виде состояния АД ($K_{АД}$).

В качестве общей оценки технического состояния АЭП в виде коэффициента $K_{ТС}$ на основе 4.2-4.5, как:

$$K_{ТС} = K_{АД} = g_1 K_{d1j} + g_2 K_{d2j} + g_3 K_{d3j} + g_4 K_{d4j} = \sum_{i=1}^n g_i \sum_{j=1}^m \frac{I_{dij}}{I_{ст_max}}, \quad (4.6)$$

где g_i – весовые функции, определяемые с учетом критериев энергоэффективности K_I и работоспособности $\sum K_{Me}$.

С учетом пороговых значений частотных составляющих п. 3.4 выполнено нормирование уровней технического состояния АЭП с рекомендациями по дальнейшей эксплуатации (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Уровни оценки технического состояния АЭП

Индикатор технического состояния $K_{ТС}$	Характеристика технического состояния	Рекомендации к эксплуатации
1	2	3
$0 < K_{ТС} \leq 0,1$	Исправное состояние до порога проявления дефектов	Работа в нормальном режиме
$0,1 < K_{ТС} \leq 0,2$	Исправное состояние с проявлением отклонений, не оказывающих влияние на энергетические и механические характеристики	Работа в нормальном режиме с уменьшением интервала измерений
$0,2 < K_{ТС} \leq 0,4$	Частично неисправное состояние с проявлением дефектов, оказывающим влияние на энергетические и механические характеристики	Допускается при постоянном мониторинге и реализации алгоритмов упреждающего управления
$0,4 < K_{ТС} \leq 1$	Неисправное состояние	Экстренная остановка

Программная реализация алгоритмов в виде программного кода представлена в ПРИЛОЖЕНИИ В.

4.3 Способы оценки технического состояния электропривода

Система оценки технического состояния АЭП представляет аппаратно-программный комплекс, включающий аппаратную часть как устройство диагностики (патент № 2727386) [45]. Схема устройства представлена на рисунке 4.8.

Устройство диагностики и оценки технического состояния электродвигателей и передаточных устройств (рисунок 4.8) содержит блок обработки информации 7, состоящий из не менее чем двух комплектов датчиков тока и напряжения 1, 2, 3, подключенных параллельно к блоку функциональной диагностики 5 и блоку прогнозирования 4, а выходы блоков прогнозирования 4 и функциональной диагностики 5 подключены к блоку расчета остаточного ресурса 6.

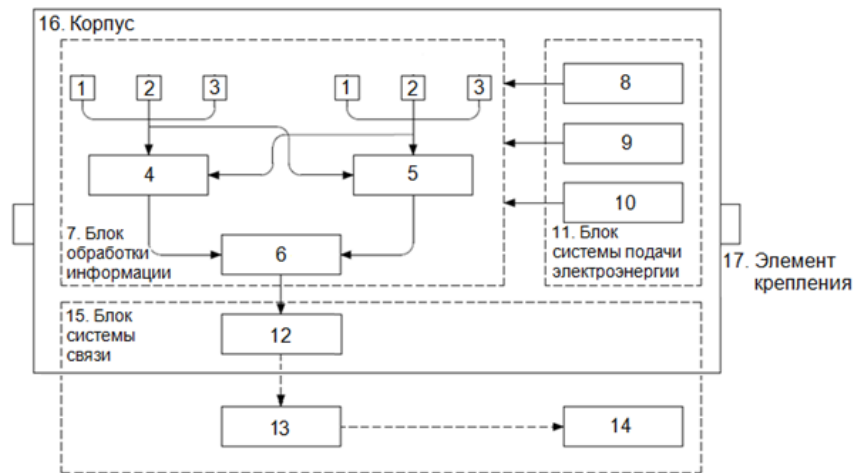


Рисунок 4.8 – Схема устройства: 1, 2, 3 – датчики тока и напряжения на эффекте Холла; 4 – блок прогнозирования; 5 – блок функциональной диагностики; 6 – блок расчета остаточного ресурса; 7 – блок обработки информации; 8 – аккумуляторная батарея; 9 – соединительный разъем под кабель питания; 10 – блок автономного питания; 11 – блок системы подачи электроэнергии; 12 – передатчик; 13 – сервер; 14 – мобильное устройство; 15 – блок системы связи; 16 – корпус; 17 – элемент крепления

Блок системы связи 15, включающий передатчик 12, вход которого соединен с выходом блока расчета остаточного ресурса 6, передатчик 12 подключен по беспроводному каналу к серверу 13 и через него с мобильным устройством или ПК 14. Блок обработки информации 7 подключен к блоку системы подачи электроэнергии 11, через соединительный разъем под кабель питания 9 от аккумуляторной батареи 8 или блока автономного питания 10. Блок обработки информации 7, блок системы подачи электроэнергии 11 и блок системы связи 15 установлены в корпусе 16, который закреплен на электродвигателе при помощи элементов крепления 17.

При помощи датчиков температуры 1, датчиков шума 2 и датчиков вибрации 3 измеряются температура и вибрации на корпусе и шумовой эффект работы электродвигателя. На основе данных, полученных от датчиков температуры 1, датчиков шума 2 и датчиков вибрации 3 блок функциональной диагностики 5 определяет фактическое техническое состояние объекта, а блок прогнозирования 4 рассчитывает ожидаемое изменение измеряемых параметров, а затем блок расчета остаточного ресурса 6 производит на основании данных, поступивших из блока прогнозирования 4 и блока функциональной диагностики 5, расчет ожидаемого срока службы объекта диагностирования. Блок обработки информации 7, который передает

посредством блока системы связи 15 данные на сервер 13, а через него на мобильное устройство 14 при помощи передатчика 12. Электропитание осуществляется от блока системы подачи электроэнергии 11, через разъем под кабель питания 9, который передает электроэнергию от аккумуляторной батареи 8 или от блока автономного питания 10.

Подключение устройства диагностики двигателей переменного тока при питании от АИН осуществляется согласно схеме (рисунок 4.9), подтверждаемой патентом на полезную модель [48].

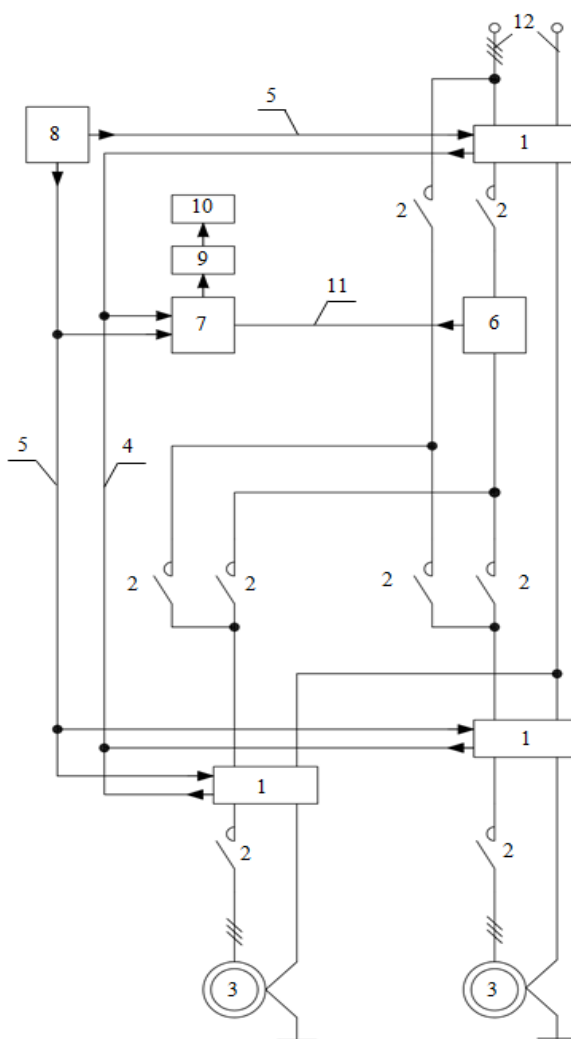


Рисунок 4.9 – Схема подключения устройства диагностики переменного тока с преобразователем частоты: 1 – блок измерений; 2 – коммутационный аппарат; 3 – двигатель переменного тока; 4 – шина сигналов; 5 – шина питания; 6 – статический преобразователь частоты; 7 – микроконтроллерный блок; 8 – блок питания; 9 – плата сбора данных; 10 – портативный компьютер; 11 – каналы задания; 12 – электрическая линия.

Схема подключения устройства диагностики двигателей переменного тока с преобразователем частоты (рисунок 4.9) содержит измерительные

блоки 1 (рисунок 4.6), подключенные к электрической линии 12, выходы которых посредством шины сигнала 4 подключены на вход микроконтроллера 7, на вход которого также подключен канал задания 11 от преобразователя частоты 6, при этом выход микроконтроллера 7 подключен к плате сбора данных 9, выход которой соединен с портативным компьютером 10, питание микроконтроллерного блока 7 и измерительных блоков 1 осуществляется от блока питания 8 посредством шины питания 5, при этом один из блоков измерений 1 установлен на входе статического преобразователя частоты 6, а оставшиеся установлены на входах двигателей переменного тока 3, подключенных к статическому преобразователю частоты 6. Кроме этого, параллельно статическому преобразователю частоты 6 и блоку измерений 1 на его входе, двигатели переменного тока 3 через группу коммутационных аппаратов 2 подключены непосредственно к электрической линии 12.

В нормальном режиме работы статический преобразователь частоты 7 подключен к электрической линии 12 и регулирует частоту вращения одного из группы АД 3 в соответствии с технологическим процессом, когда остальные АД 3 из группы работают от электрической линии 12. При таком режиме работы блоки измерений 1 на входах регулируемого и нерегулируемого АД 3 регистрируют значения токов и напряжений в каждой фазе, а соответственно блок измерений 1 на входе статического преобразователя 6 регистрирует параметры электрической линии 12, с дальнейшей передачей данных с блоков измерений 1 посредством шины сигналов 5 на микроконтроллерный блок 7, на который также поступает сигнал задания статического преобразователя частоты 6 по каналу задания 11. Из регистрируемых данных токов, напряжений и сигнала задания преобразователем частоты 6 формируется ретроспективная база данных технического состояния АЭП, состоящая из уровней согласно п. 4.2. Повышение точности и достоверности оценки технического состояния АД 3, регулируемого при помощи статического преобразователя частоты 6,

достигается при коммутации АД 3 от статического преобразователя частоты 6 к электрической линии 12 при выходе на номинальный режим для записи токов и напряжений, потребляемых АД, и обратно, при помощи двух групп коммутационных аппаратов 2.

4.4 Имитационное моделирование систем управления с интегрированной системой диагностики и оценки технического состояния

Первый этап реализации системы диагностики в АЭП связан с моделированием систем скалярного и векторного управления с анализом их поведения при дефектах. Второй этап заключается в интеграции системы диагностики в систему управления. С целью этого были разработаны модели АЭП с ССУ и ВСУ.

Моделирование силовой части ЭП согласно структуре силовой части двухзвенного ПЧ на рисунке 1.3 выполнено в среде *Matlab Simulink* в части 6-ти пульсного НВ (рисунок 4.10 а) и двухуровневого АИН (рисунок 4.10 б).

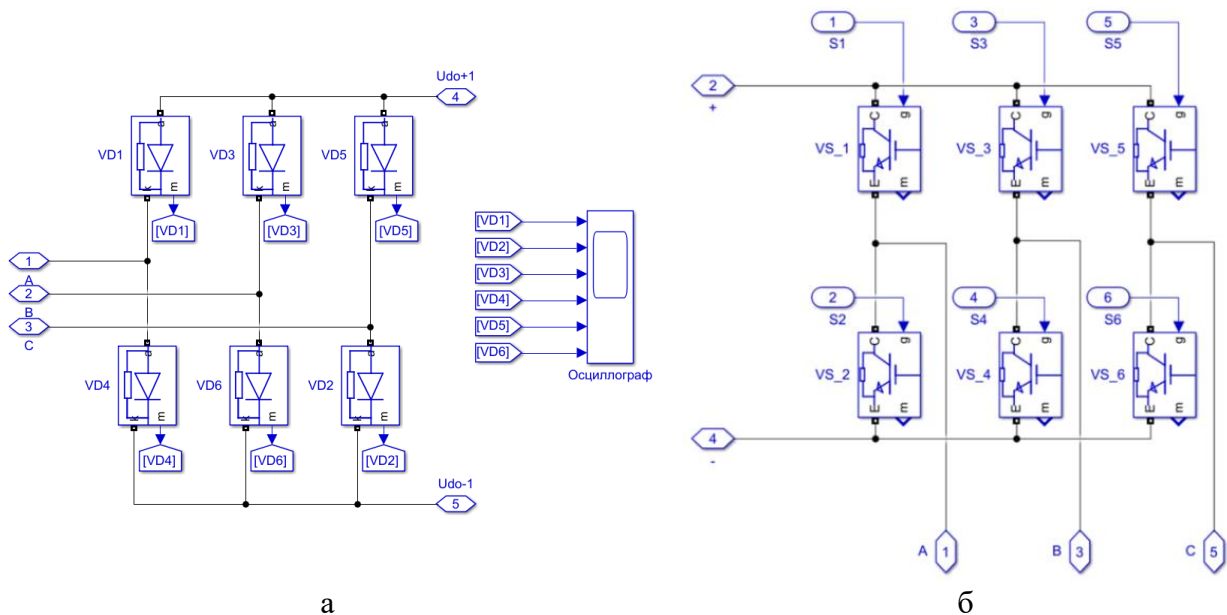


Рисунок 4.10 – Модель силовой части преобразователя: а – НВ: VD1-6 выпрямительные диоды; б – АИН: VS1-6 IGBT-транзисторы

На основе силовой части (рисунок 4.10) и уравнений (3.15-3.32) разработана ССУ АЭП (рисунок 4.11), замкнутая по частоте вращения ротора, и ВСУ АЭП с ориентацией по потокосцеплению ротора (рисунок 4.12-4.13) с квадратичным (вентиляторным) характером нагрузки.

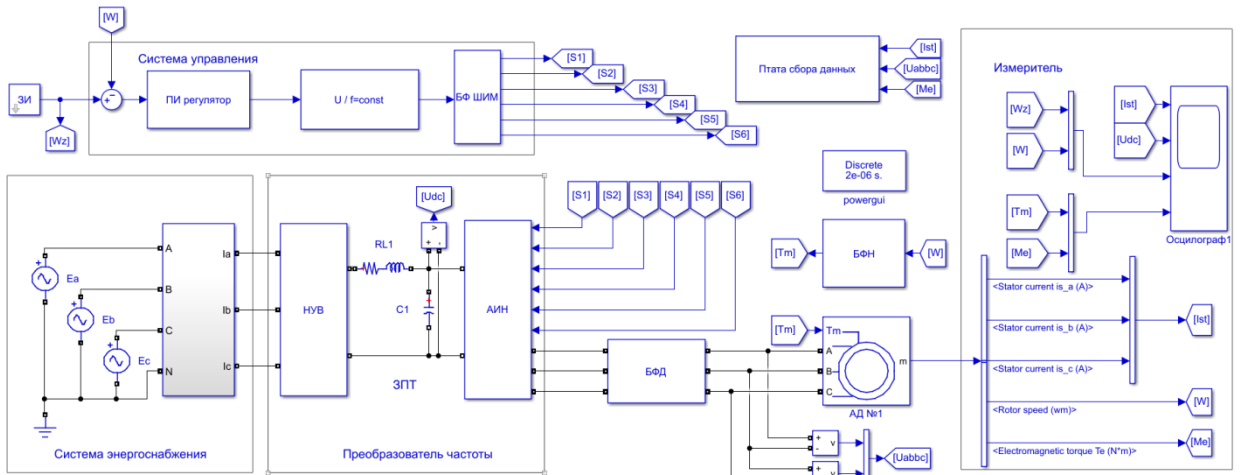


Рисунок 4.11 – Модель ССУ АД, замкнутая по частоте вращения ротора: ЗИ – задатчик интенсивности по скорости; БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; БФД – блок формирования дефектов; БФН – блок формирования нагрузки; ЗПТ – звено постоянного тока

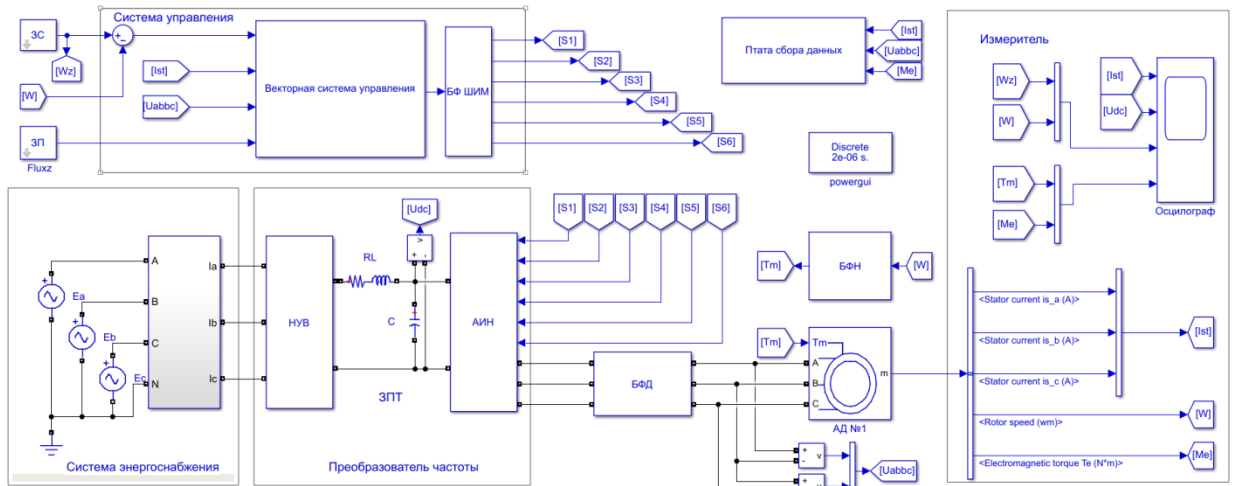


Рисунок 4.12 – Модель векторной системы управления АД: ЗС – задатчик скорости; ЗП – задатчик потока ротора; БФ ШИМ – блок формирования ШИМ; БФД – блок формирования дефектов; БФН – блок формирования нагрузки; ЗПТ – звено постоянного тока

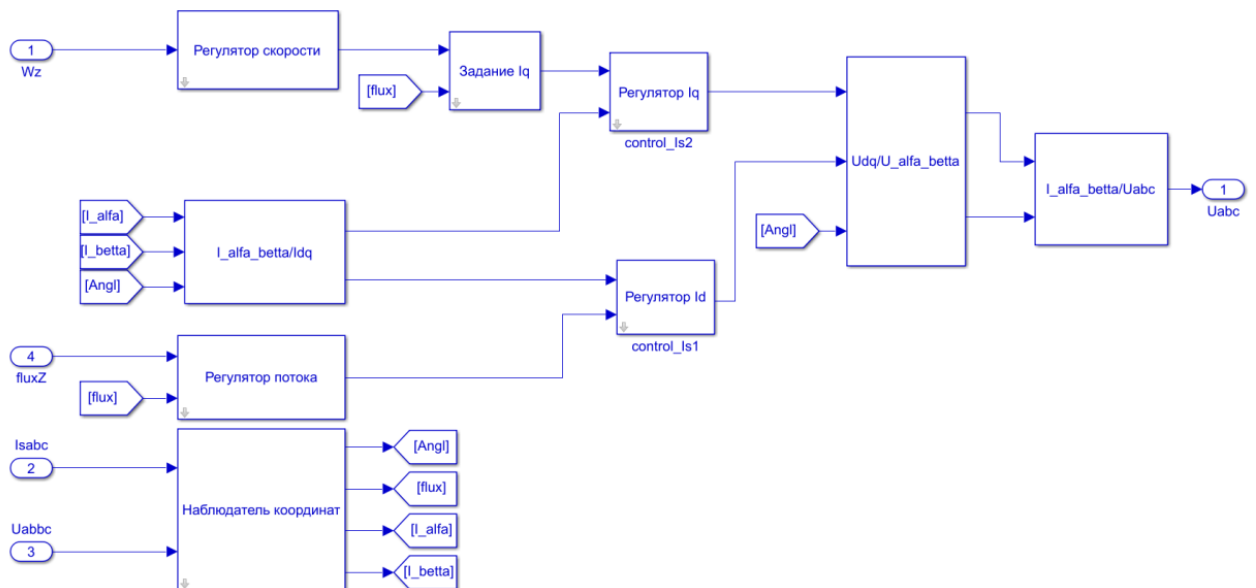


Рисунок 4.13 – Векторная система управления

Блок формирования нагрузки (БФН) (рисунок 4.14 а) создает момент сопротивления на валу пропорционально квадрату частоты вращения с пуском под нагрузкой, сбросом/набросом нагрузки 130% и 150% от номинальной. Эквивалентное межвитковое замыкание создается блоком формирования дефектов (БФД) (рисунок 4.14 б) в одной из фаз двигателя.

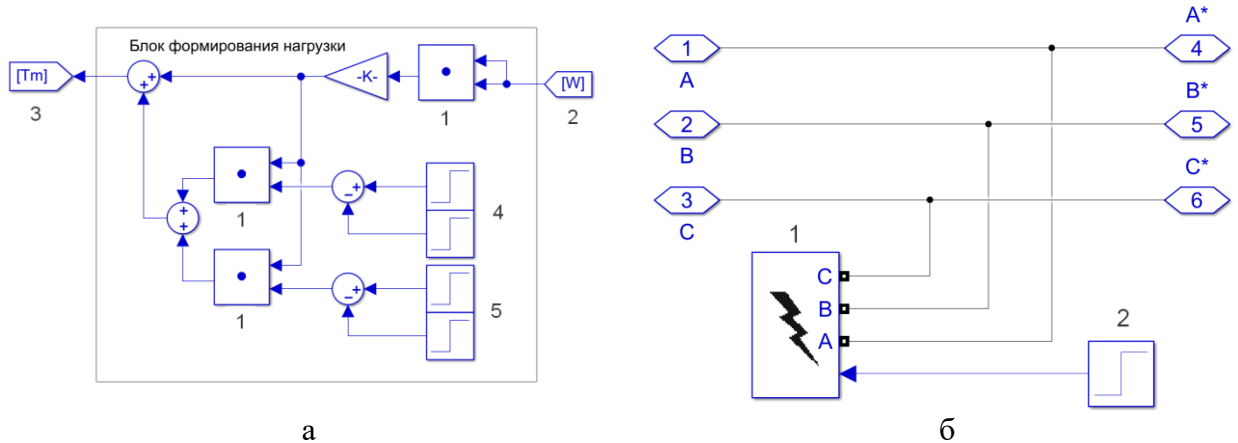


Рисунок 4.14 – блок формирования нагрузки (а): 1-умножение; 2-частота вращения; 3-момент сопротивления; 4,5-сброс наброс нагрузки (*step*); и блок формирования дефектов (б): 1-блок КЗ; 2-задание времени возникновения КЗ

При номинальной нагрузке АД в момент возникновения эквивалентного межвиткового короткого замыкания в ССУ (рисунок 4.15) наблюдается рост частоты и амплитуды пульсации момента с незначительной просадкой амплитуд фазных токов даже при повышении напряжения на ЗПТ.

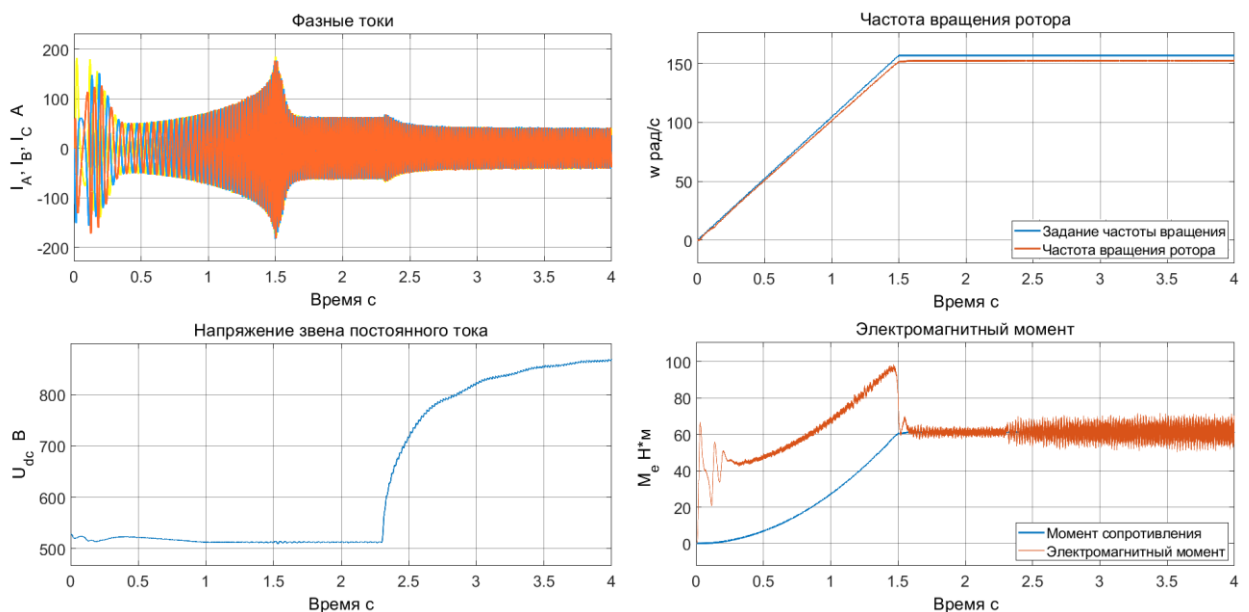


Рисунок 4.15 – Осциллограммы АЭП с ССУ при номинальной нагрузке и межвитковом КЗ в момент времени $t=2.3$ с

При аналогичном режиме работы АЭП с ВСУ (рисунок 4.16) за счет контуров регулирования тока статора и потокосцепления ротора обеспечивается поддержание амплитуд фазных токов и момента, как и до момента возникновения дефекта, за счет увеличения напряжения ЗПТ.

При 30% перегрузке АД в момент возникновения эквивалентного межвиткового короткого замыкания в ССУ (рисунок 4.17) и ВСУ (рисунок 4.16), аналогичные процессы прослеживаются, как и при номинальном режиме работы, с увеличением интенсивности пропорционально нагрузке. АЭП при таких условиях не теряет работоспособность, однако напряжение ЗПТ превышает допустимые уставки.

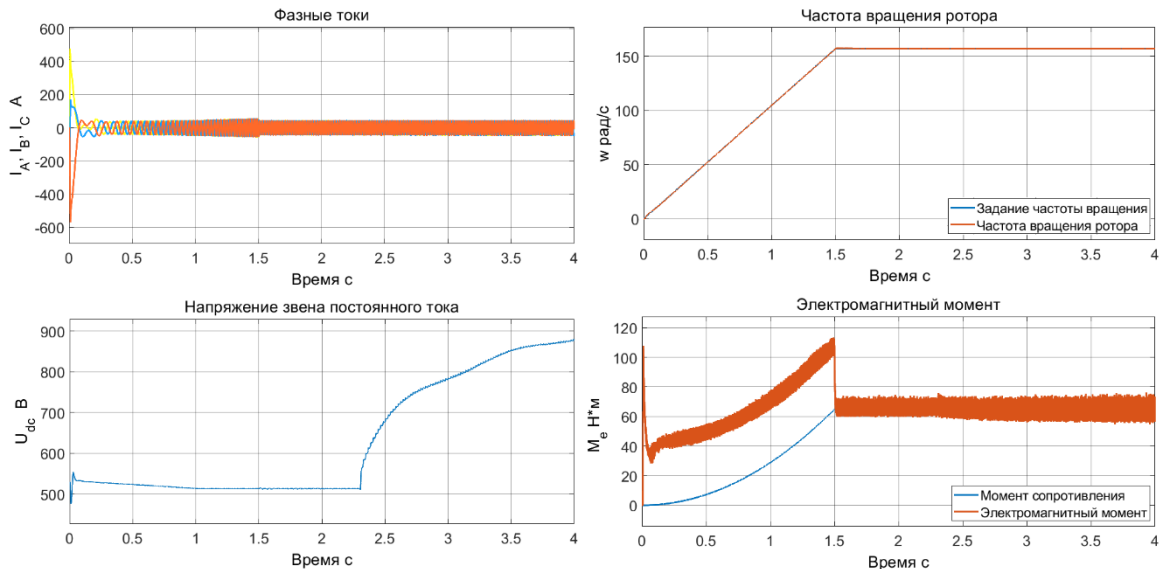


Рисунок 4.16 – Осциллограммы АЭП с ВСУ при номинальной нагрузке и межвитковом КЗ в момент времени $t=2.3$ с

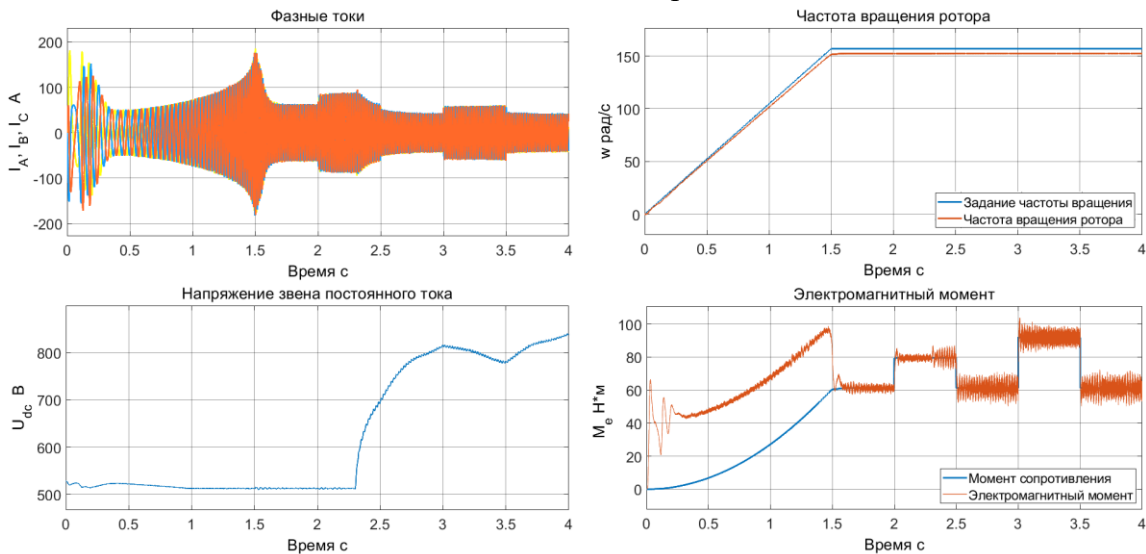


Рисунок 4.17 – Осциллограммы АЭП с ССУ при 30% перегрузке в момент времени возникновения межвиткового КЗ ($t=2.3$ с)

При 50% перегрузке АД в момент возникновения эквивалентного межвиткового короткого замыкания в ССУ (рисунок 4.19). При 50% перегрузке АД в момент возникновения эквивалентного межвиткового короткого замыкания в ВСУ (рисунок 4.20).

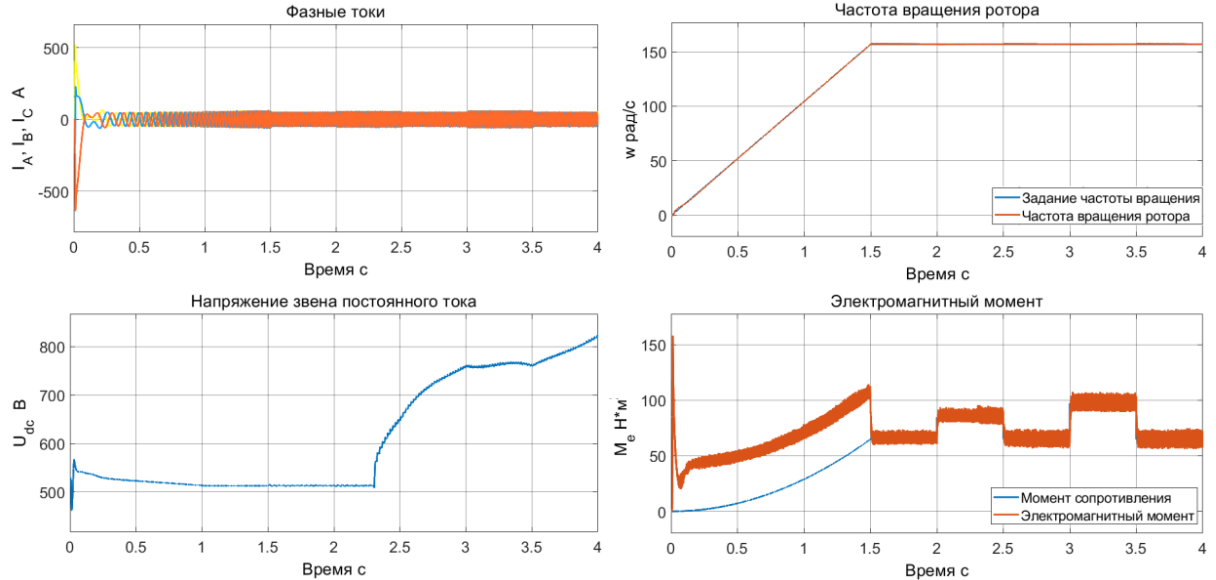


Рисунок 4.18 – Осциллограммы АЭП с ВСУ при 30% перегрузке в момент времени возникновения межвиткового КЗ ($t=2.3$ с)

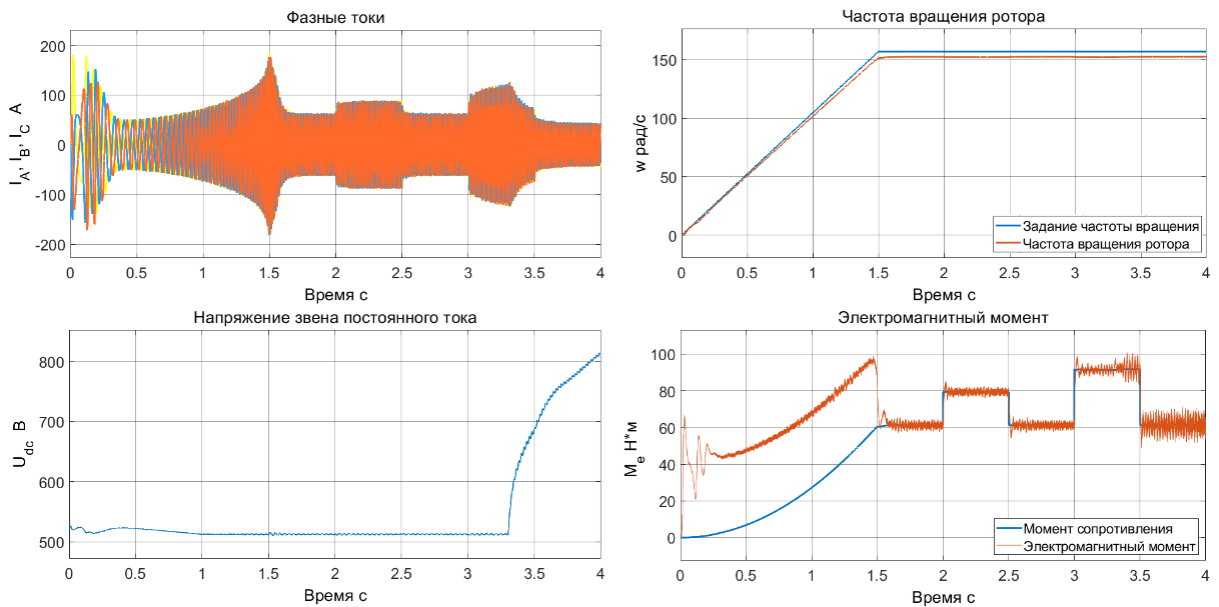


Рисунок 4.19 – Осциллограммы АЭП со ССУ при 50% перегрузке в момент времени возникновения межвиткового КЗ ($t=3.3$ с)

При 50% перегрузке АД при критическом межвитковом коротком замыкании в ССУ (рисунок 4.21). При 50% перегрузке АД при критическом межвитковом коротком замыкании в ВСУ (рисунок 4.22).

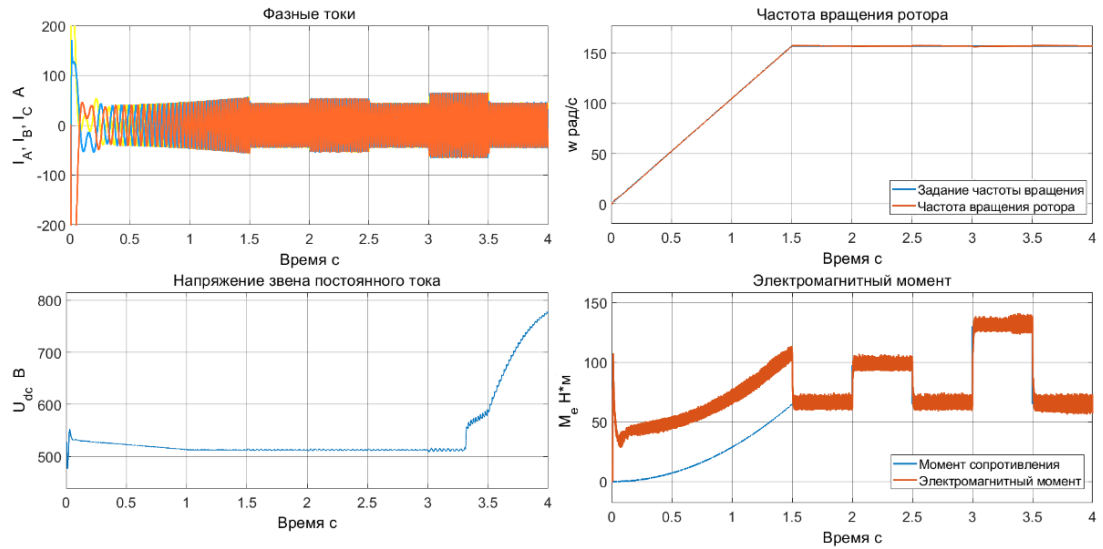


Рисунок 4.20 – Осциллограммы АЭП с ВСУ при 50% перегрузке в момент времени возникновения межвиткового КЗ ($t=3.3$ с)

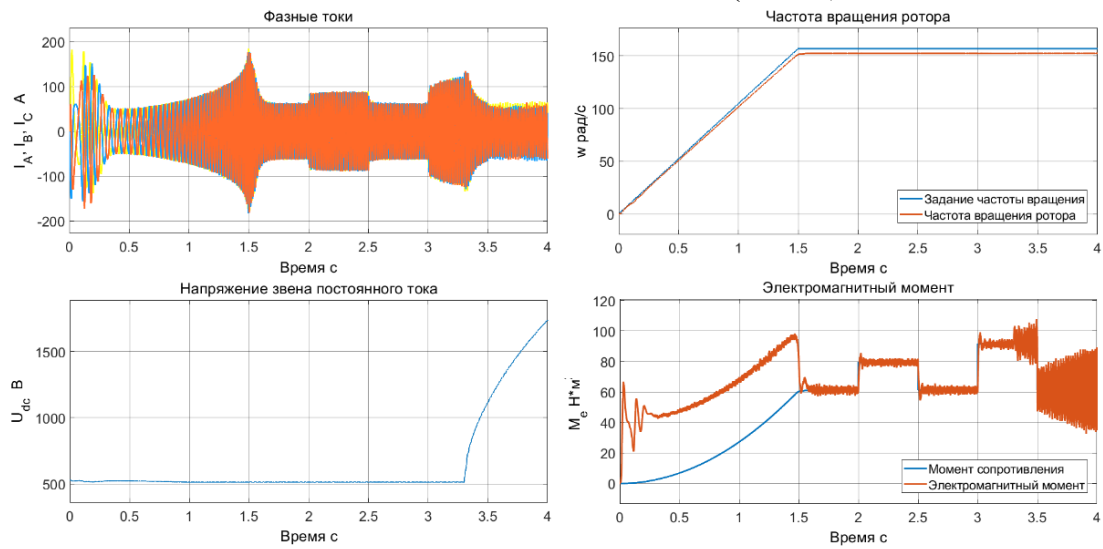


Рисунок 4.21 – Осциллограммы АЭП с ССУ при 50% перегрузке при критическом уровне межвиткового КЗ ($t=3.3$ с)

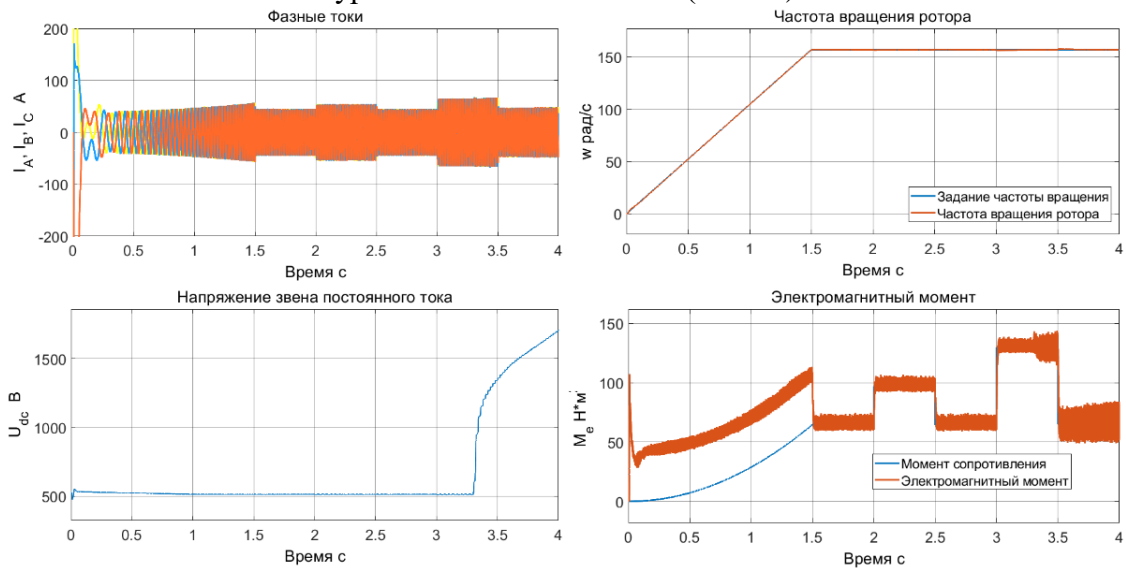


Рисунок 4.22 – Осциллограммы АЭП с ВСУ при 50% перегрузке при критическом межвиткового КЗ ($t=3.3$ с)

Анализ поведения имитационных моделей ССУ и ВСУ при возникновении дефектов подтверждает результат численного моделирования (п. 3.2). Результаты моделирования подтверждают, что:

- В АЭП с ССУ, замкнутой по частоте вращения, возникновение дефекта (например, межвитковое КЗ) приводит к росту ошибки регулирующих устройств, повышению потребляемого тока и, как следствие, к повышению потребляемой скорости, а также росту пульсаций электромагнитного момента, определяемого величиной нагрузки и уровнем дефекта.

- В АЭП с ВСУ, ориентированной по потоку ротора, при возникновении дефекта до определенного уровня (например, межвитковое КЗ) изменение параметров АД за счет контуров токов и повышения уровня напряжения на ЗПТ поддерживается скорость и момент с заданной точностью. Однако уровень дефекта, соответствующий критическому изменению индуктивности цепи намагничивания L_m , вызывает рост пульсаций момента и потребляемой мощности, ведущих к срабатыванию защит и отключению АЭП от питания.

1	Time	ТокА	ТокВ	ТокС	Напряжение А	Напряжение В	Напряжение С	Скорость
2	0.000000	0.555716	-9.586263	9.333607	136.817270	175.387895	-309.520706	1451.556059
3	0.000100	0.071484	-9.525971	9.363755	145.577145	166.515172	-310.409449	1451.662975
4	0.000200	-0.261426	-9.314949	9.363755	153.850360	157.920591	-311.210774	1451.823351
5	0.000300	-0.533807	-8.953196	9.514498	161.385736	150.285599	-311.633291	1451.930267
6	0.000400	-0.866716	-8.802466	9.665242	169.344977	142.734049	-312.099517	1452.037184
7	0.000500	-1.018039	-8.470860	9.815985	177.712384	135.099057	-312.347199	1452.251018
8	0.000600	-1.502271	-8.410568	9.906431	186.566450	126.170706	-312.405477	1452.357935
9	0.000700	-1.774651	-8.048815	10.027025	195.279229	116.366208	-312.449186	1452.304476
10	0.000800	-2.258883	-8.109108	10.117471	203.662335	105.935891	-312.288921	1452.357935
11	0.000900	-2.379941	-7.747355	10.418958	211.182012	95.575110	-312.041238	1452.411393
12	0.001000	-2.712851	-7.566479	10.599849	218.324920	86.215639	-311.341900	1452.304476
13	0.001100	-2.985232	-7.295165	10.841038	224.996868	77.120402	-309.972362	1452.304476
14	0.001200	-3.408935	-7.234873	10.901336	231.354841	68.303308	-307.903486	1452.304476
15	0.001300	-3.772109	-7.053997	10.901336	237.367443	59.430585	-304.698185	1452.304476
16	0.001400	-3.953696	-6.571660	11.052079	243.568430	50.224092	-300.385599	1452.197559
17	0.001500	-4.195812	-6.179762	11.202822	248.560616	39.014978	-295.271687	1452.304476
18	0.001600	-4.619515	-6.059178	11.172673	252.453894	28.042284	-288.555124	1452.357935

Рисунок 4.23 – Вид базы первичных данных АЭП

- Нарушение оптимумов энергоэффективности и работоспособности АЭП с ССУ или ВСУ до уставок срабатывания защит определяет вид и уровень дефекта.

Интеграция системы диагностики в моделях АЭП реализована в виде платы сбора данных (рисунки 4.11-4.12). Запись данных скорости вращения, тока и напряжения, синхронизированных по времени, производится в базу данных (рисунок 4.23) согласно алгоритмам п. 3.2-3.4 и п. 4.2.

4.5 Описание лабораторного стенда и экспериментальных исследований алгоритмов оценки технического состояния

С целью апробации и верификации результатов теоретических исследований, численного и имитационного моделирования был разработан лабораторный стенд.

В соответствии с обобщённой структурной схемой АЭП (рисунок 4.24) в Учебно-научном Центре цифровых технологий в лаборатории компании *Schneider Electric* разработан исследовательский стенд для имитации и диагностики дефектов АД в АЭП.

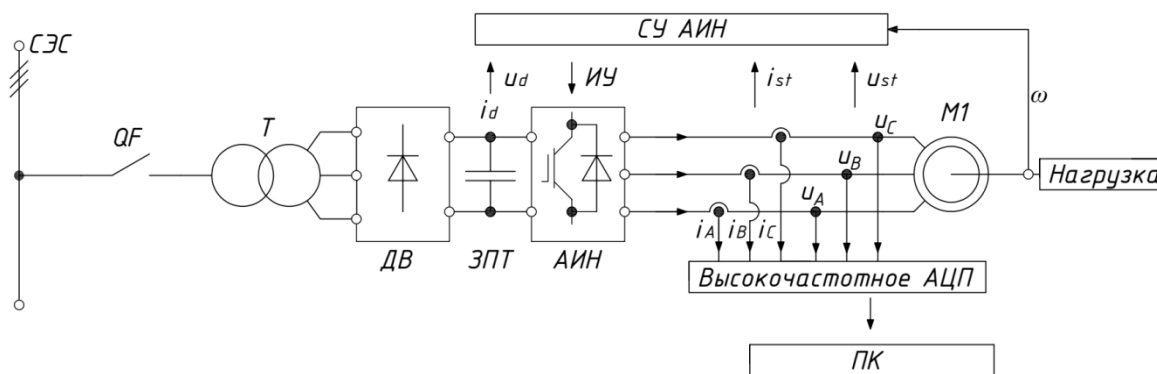


Рисунок 4.24 – Обобщённая структурная схема АЭП: СЭС – система энергоснабжения; QF – вводной выключатель; Т – трансформатор; ДВ – диодный выпрямитель; ЗПТ – звено постоянного тока; АИН – автономный инвертор напряжения; СУ – система управления; ИУ – импульсы управления; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; М1 – асинхронный двигатель; ПК – персональный компьютер

Лабораторная установка (рисунок 4.25) предназначена для исследования энергетических и механических характеристик АЭП при питании АД от АИН с созданием эквивалентных дефектов в двигателе.

Установка включает оборудование с техническими характеристиками (ПРИЛОЖЕНИЕ Б):

- преобразователь частоты ATV900 Schneider Electric (рисунок 4.25);
- контроллер M340 (рисунок 4.26);
- высокопроизводительная модульная платформа NI PXI-1042Q (рисунок 4.27);
- высокочастотное АЦП NI PXI-6251 (рисунок 4.27);
- силовой измерительный модуль с датчиками тока на эффекте Холла (рисунок 4.28);
- стенд с каскадом асинхронных двигателей (рисунок 4.29).



Рисунок 4.25 – Общий вид лабораторного стенда



а

б

Рисунок 4.26 – Контроллер M340: а – общий вид; б – порты и каналы подключения: 1 – процессорные модули VMXP34; 2 – платформа ввода/вывода Modicon X80 с одним или несколькими шасси; 3 – дополнительные и специализированные модули

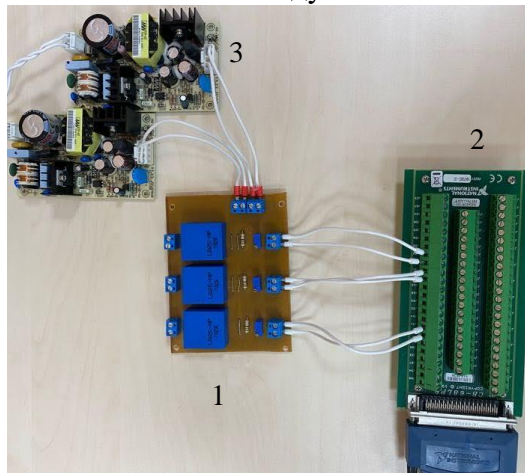


а

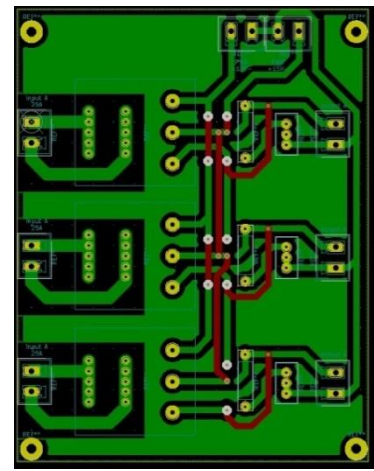


б

Рисунок 4.27 – Высокопроизводительная модульная платформа: а – NI PXI-1042Q; б – модуль высокочастотного АЦП NI PXI-6251



а



б

Рисунок 4.28 – Измерительный модуль: а – измерительная часть: 1 – силовая измерительная плата; 2 – коннекторная плата; 3 – источник напряжения $\pm 15\text{В}$; б – схема подключения датчиков тока на эффекте Холла LA-25



а



б

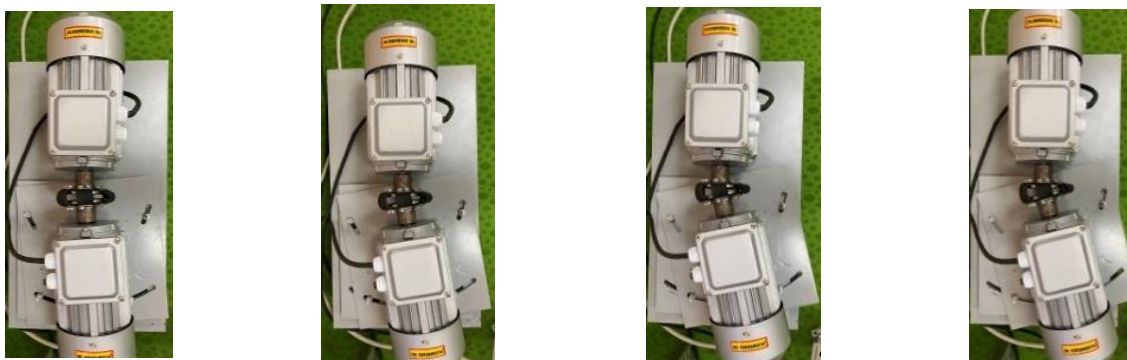
Рисунок 4.29 – Каскад асинхронных двигателей испытываемый (слева) и нагрузочный (справа): а – нормальное состояние; б – имитация эксцентриситета

Разработанная лабораторная установка (рисунок 4.25) позволяет производить испытания электрических двигателей при имитации различных видов дефектов (межвитковые короткие замыкания, износ подшипников, эксцентриситет и др.). Моделирование ситуаций механических неисправностей позволяет выполнить подвижная станина, на которую установлены электродвигатели. Асинхронные двигатели соединены между собой мягкой муфтой (рисунок 4.29), а питание их осуществляется от сети

синусоидальным напряжением 380В либо от преобразователя частоты, позволяющего плавно регулировать частоту вращения. Регулирование обеспечивается через контроллеры (рисунок 4.26) на ПК при помощи программного обеспечения по управлению электродвигателями «SoMove». Токи АД регистрируются при помощи силовой измерительной платы 1 (рисунок 4.28) с дальнейшей передачей и оцифровкой в модуле АЦП (рисунок 4.27).

Экспериментальные исследования составили несколько этапов (на примере эксцентриситета воздушного зазора):

Этап 1: Моделирование степени эксцентриситета воздушного зазора n_d путем создания несоосности валов нагрузочного и испытуемого двигателей (рисунок 4.30).



а

б

в

г

Рисунок 4.30 – Имитация степени эксцентриситета: а – $n_d=0$; б – $n_d=1$; в – $n_d=2$; г – $n_d=3$

Этап 2: Регистрация данных осуществляется датчиками тока и напряжения (рисунок 4.28) и оцифровка их при помощи высокочастотной АЦП (рисунок 4.27) с записью в виде базы данных (рисунок 4.21).

Этап 3: Анализ первичных данных фазных токов и обобщенного вектора тока. Изменение степени эксцентриситета n_d согласно рисунку 4.30 отражается в искажениях фазных токов (рисунок 4.31) и девиации годографа обобщенного вектора тока (рисунок 4.32).

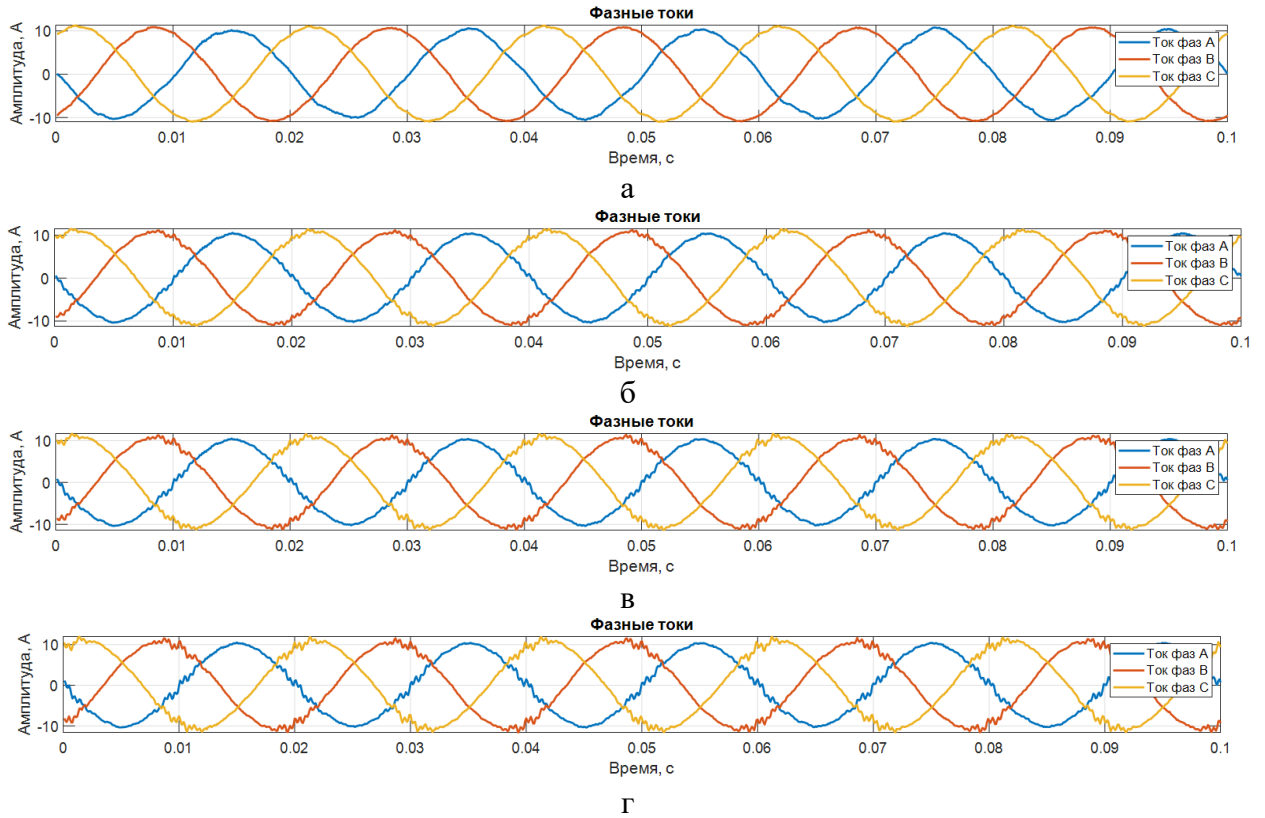


Рисунок 4.31 – Фазные токи при эксцентриситете: а – $n_d=0$; б – $n_d=1$; в – $n_d=2$; г – $n_d=3$

Этап 4: Спектральный анализ тока и оценка амплитуд частотных составляющих (рисунок 4.33, таблица 4.2), в результате которых выявлен рост расчетных частотных составляющих в зависимости от уровня дефекта с разной интенсивностью при соответствующих коэффициентах модуляции k_{m1k} .

Таблица 4.2 – Амплитуды частот спектра тока при эксцентриситете

n_d	k_{m1k}	Расчетная f_d , Гц		АД №1			
				f_d Гц		$A(f_d)$ Дб	
		+	-	+	-	+	-
1	2	3	4	5	6	7	7
0	1	729	629	731,44	631,4	-73,0	-48,2
	2	829	529	831,46	531,38	-49,9	-57,4
	3	929	429	931,5	х	-64,9	х
1	1	729	629	731,44	631,4	-71,0	-46,3
	2	829	529	831,46	531,38	-47,9	-55,4
	3	929	429	931,5	х	-62,9	х
2	1	729	629	731,44	631,4	-54,5	-43,3
	2	829	529	831,46	531,38	-44,9	-52,4
	3	929	429	931,5	х	-59,9	х
3	1	729	629	731,44	631,4	-45,4	-40,3
	2	829	529	831,46	531,38	-41,8	-49,4
	3	929	429	931,5	х	-51,5	х

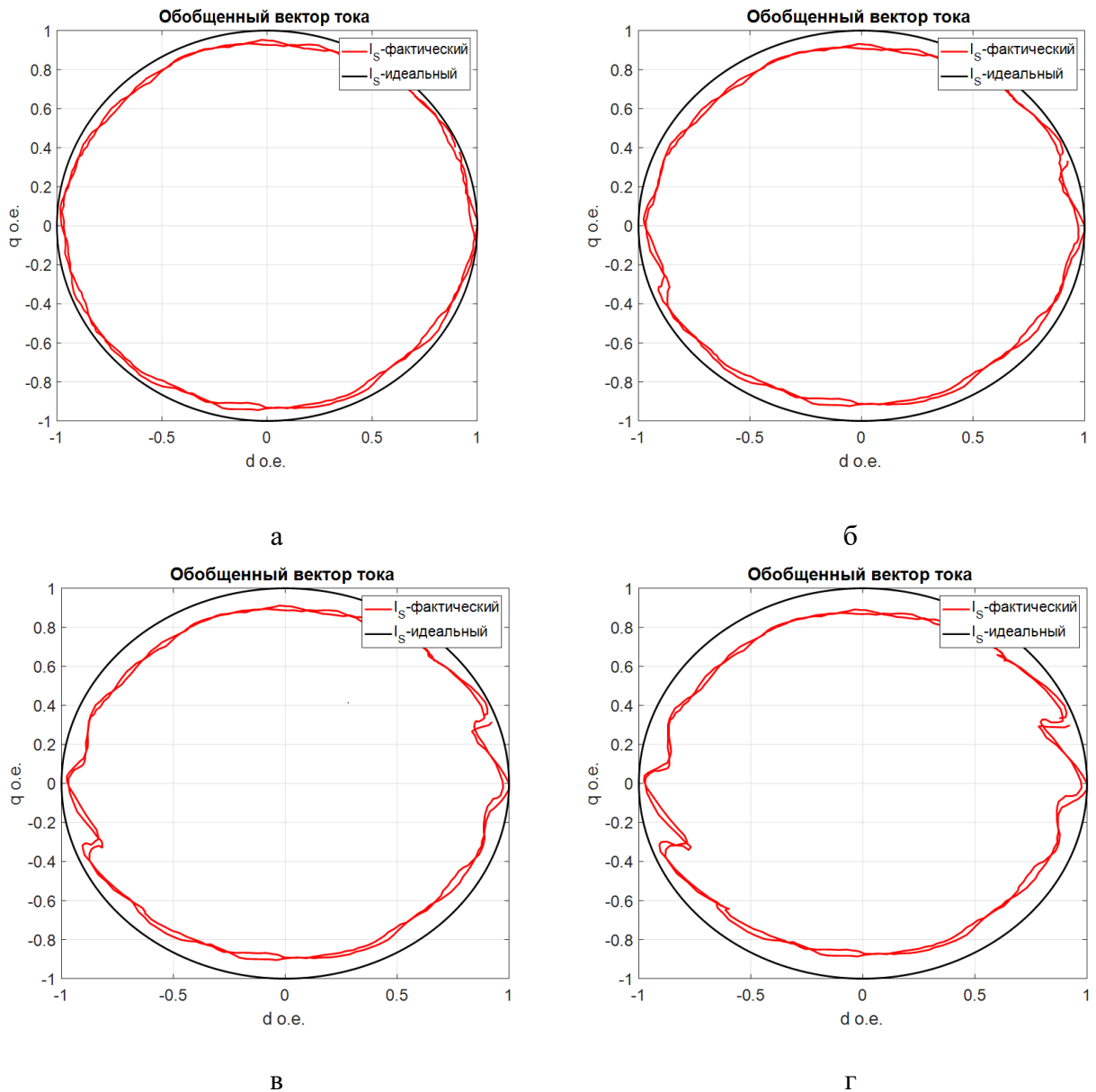


Рисунок 4.32 – Девиация годографа тока при эксцентриситете:
 а – $n_d=0$; б – $n_d=1$; в – $n_d=2$; г – $n_d=3$

Этап 5: Расчет и оценка критериев работоспособности $\sum K_{Me}$ (2.46) и энергоэффективности K_I (2.36) при эксцентриситете согласно формулам (таблица 4.2).

Таблицы 4.3 – Критерии энергоэффективности и работоспособности

Система управления	Критерий	степень эксцентриситета n_d			
		0	1	2	3
1	2	3	4	5	6
Замкнутая по частоте вращения ССУ	K_{Me}	4,8	6,1	8,1	10,4
	K_I	1,5	2,7	4,3	7,0
	ω_r	154,0	153,2	152,7	152,1

Этап 6: Построение диаграмм технического состояния (рисунок 4.34) с расчетом общего технического состояния АЭП $K_{ТС}$ (4.6) (таблица 4.4).

Таблицы 4.4 – Техническое состояние АЭП

Система управления	Индикатор технического состояния	степень эксцентриситета n_d			
		0	1	2	3
1	2	3	4	5	6
Замкнутая по частоте вращения ССУ	$K_{ТС}$	0,08	0,12	0,16	0,21

4.1 Выводы по главе 4

1. Разработаны алгоритмы оценки технического состояния асинхронного автоматизированного электропривода с уровнями оценки сигналов, элементов, узлов, устройств и общего технического состояния.

2. Разработаны и запатентованы способы и устройство оценки технического состояния автоматизированного электропривода с различными алгоритмами управления, отличающиеся алгоритмами анализа частотных составляющих и обобщенного вектора потребляемого тока (патенты № 2626231, № 2648413, № 181087, № 2727386).

3. Разработан лабораторный стенд автоматизированного электропривода с имитацией дефектов асинхронного двигателя и интегрированной системой оценки технического состояния в систему управления электропривода на базе лаборатории *Schneider Electric* Учебно-Научного Центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

4. Результаты численного и имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными на разработанном лабораторном стенде.

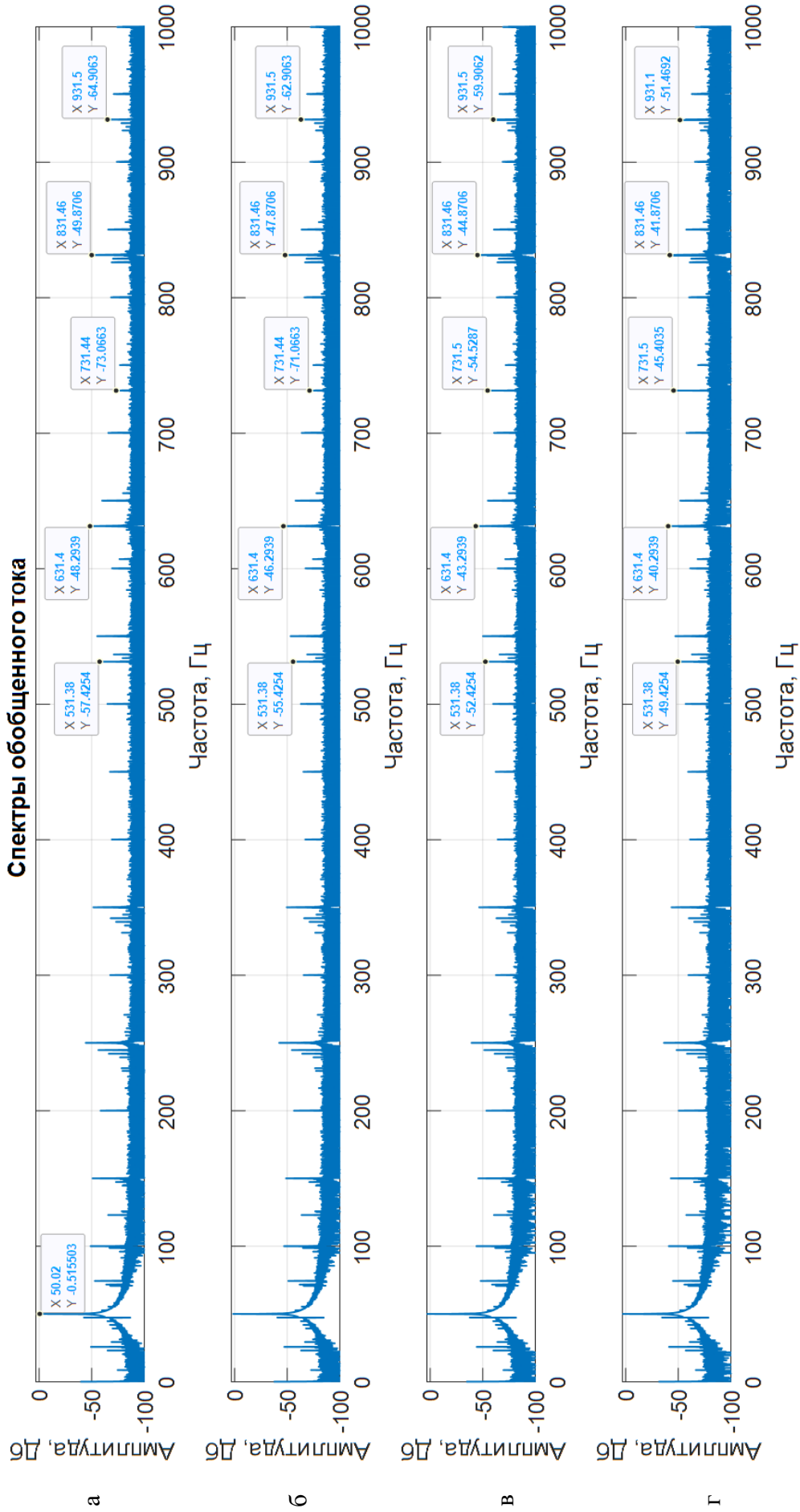


Рисунок 4.33 – Спектры тока при эксцентриситете: а – $n_d=0$; б – $n_d=1$; в – $n_d=2$; г – $n_d=3$

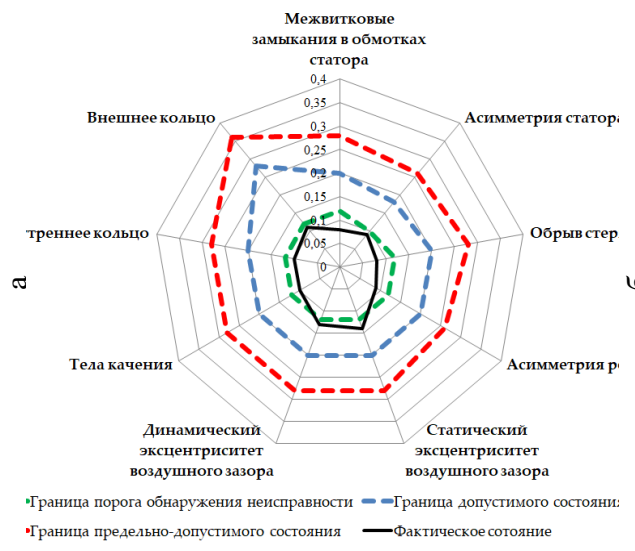
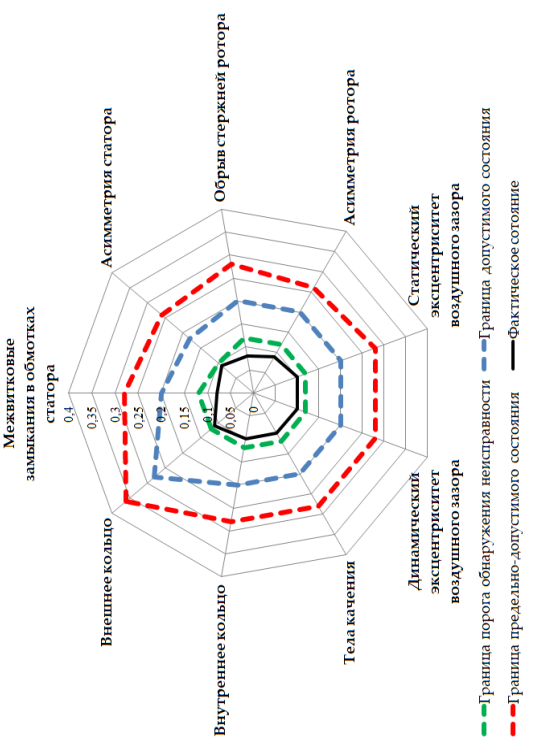
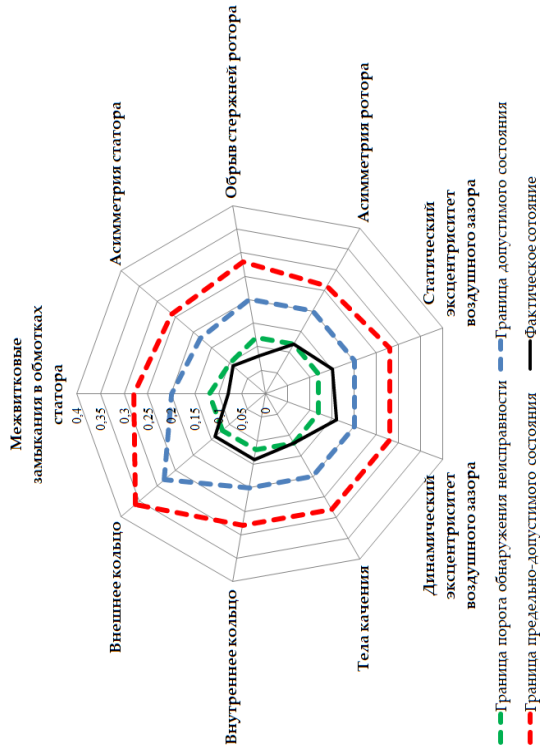


Рисунок 4.34 – Диаграмма технического состояния: а – $n_d=0$; б – $n_d=1$; в – $n_d=2$; г – $n_d=3$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новый подход к решению актуальной научно-технической задачи оценки технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом по частотным составляющим спектра тока.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Выполнено математическое описание частотных составляющих в спектре потребляемого асинхронным двигателем тока, соответствующих дефектам статора, ротора, подшипников и эксцентриситета в воздушном зазоре, с алгоритмом их идентификации и подтверждением результатов промышленным экспериментом на АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР». (Справка внедрения результатов работы ПРИЛОЖЕНИЕ Д).

2. Обоснованы критерии оценки энергоэффективности и работоспособности автоматизированного электропривода при возникновении дефектов в асинхронном двигателе в виде суммарного коэффициента искажения тока статора и суммарного коэффициента пульсаций электромагнитного момента, на основе которых построена оптимальная область устойчивой работоспособности электропривода.

3. Разработаны численные и имитационные модели автоматизированного электропривода для исследования поведения скалярной и векторной систем управления при условиях эквивалентных неисправностей асинхронного двигателя (патент № 2020615940).

4. Средствами численного и имитационного моделирования определены пороговые значения амплитуд частотных составляющих в спектре потребляемого асинхронным двигателем тока, соответствующие дефектам статора, ротора, подшипников и искажению магнитного поля в воздушном зазоре, с учетом реализованных защит, критических значений

параметров схемы замещения и требований к качеству и точности регулирования (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

5. Установлены зависимости энергетических и механических характеристик асинхронного электропривода с векторной и скалярной системой управления при изменении индуктивности цепи намагничивания от технического состояния.

6. Разработаны алгоритмы оценки технического состояния асинхронного автоматизированного электропривода с уровнями оценки сигналов, элементов, узлов, устройств и общего технического состояния.

7. Разработаны и запатентованы способы и устройство оценки технического состояния автоматизированного электропривода с различными алгоритмами управления, отличающиеся алгоритмами анализа частотных составляющих и обобщенного вектора потребляемого тока (патенты и свидетельства: № 2626231, № 2648413, № 181087, № 2727386).

8. Разработан лабораторный стенд автоматизированного электропривода с имитацией дефектов асинхронного двигателя и интегрированной системой оценки технического состояния в систему управления электропривода, на базе лаборатории Schneider Electric Учебно-научного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

9. Результаты численного и имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными на разработанном лабораторном стенде.

10. Сформулированы рекомендации по направлению дальнейших исследований в части косвенного вычисления фактического значения индуктивности намагничивания при продолжительных режимах работы электропривода с последующей разработкой средств коррекции системы управления.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АД – асинхронный двигатель;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
- АЭП – автоматизированный электропривод;
- ВСУ – векторная система управления;
- ЗПТ – звено постоянного тока;
- ИМ – исполнительный механизм;
- КЗ – короткое замыкание;
- НВ – неуправляемый выпрямитель;
- ПЧ – преобразователь частоты;
- СУ – система управления;
- ССУ – скалярная система управления;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
- ЭТК – электротехнический комплекс;
- ЭП – электропривод;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюхов, И. И. Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии: учеб. пособие / И. И. Артюхов, А. Г. Сошитов, И. И. Бочкарева. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 124 с.
2. Бабанова, И. С. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата / И. С. Бабанова, Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королёв** // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – 2017. – № 3(36). – С. 47-54.
3. Барков, А. В. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: методические указания / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов. – Северо-Западный учебный центр, г. Санкт-Петербург, 2006. – С. 36.
4. Бернштейн, А. Я. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А. Я. Бернштейн, Ю. М. Гусяцкий, А. В. Кудрявцев, Р. С. Сарбатов / под ред. Р. С. Сарбатова. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
5. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: «Машиностроение», 1978. – 240 с.: ил.
6. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкции / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.: ил.
7. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; Под ред. И. Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
8. Брускин, Д. Э. Электрические машины. Ч. 2: Учебник для электротехн. спец. вузов / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
9. Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода / Б. Ю. Васильев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.

10. Вейнгер, А. М. Электроприводы переменного тока: конспект лекций / А. М. Вейнгер. – Москва, 2009. – 20 с.
11. Вейнреб, К. Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: автореферат диссертации доктора. техн. наук: 05.09.01 / Вейнреб Конрад Беноневич; НТЦ ФСК ЕЭС – Москва, 2012. – 58 с.: ил.
12. Вершинин, В. И. Электромагнитная и электромеханическая совместимость в электротехнических системах с полупроводниковыми преобразователями / В. И. Вершинин, Э. А. Загривный, А. Е. Козярук. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2000. – 67 с.
13. Виноградов, А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2003. – № 7. С. 7-17.
14. Виноградов, А. Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А. Виноградов, А. Сибирцев, И. Колодин // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 50-55.
15. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
16. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
17. Гельман, М. В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 424 с.
18. ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.
19. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

20. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Норма качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
21. ГОСТ IEC 60034-18-31-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-31. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Методы испытаний для шаблонных обмоток. – М.: Стандартинформ, 2015. – 26 с.
22. ГОСТ ISO 20958-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2019. – 29 с.
23. ГОСТ Р 50938-2013 Ремонт, установка и техническое обслуживание электрических машин и приборов. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
24. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. – М.: Стандартинформ, 2011. – 20 с.
25. Гридин, В. М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным / В. М. Гридин // Электричество. – 2018. – №. 9. – С. 44-48.
26. Жданеев, О. В. Перспективы технологий индустрии 4.0 в ТЭК России / О. В. Жданеев, В. С. Чубоксаров // Энергетическая политика. – 2020. – №. 7 (149). – С. 16-33.
27. Жуковский, Ю. Л. Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королёв**, И. С. Бабанова // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 6. – С. 20–25.
28. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование / Ю. Н. Калачев // М.: ЭФО. – 2013. – 63 с.
29. Калачев, Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю. Н. Калачев // М.: Самиздат. – 2015. – 71 с.

30. Козярук, А. Е. Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов / А. Е. Козярук, А. В. Кривенко, Ю. Л. Жуковский, А. А. Коржев, С. В. Бабурин, М. С Черемушкина. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. – 90 с.
31. Козярук, А. Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков, А. Г. Народицкий (ред.). – СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. – 127 с.
32. Колесников, В. В. Моделирование характеристик и дефектов трехфазных асинхронных машин: Учебное пособие / В. В. Колесников. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 144 с.: ил.
33. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин. Часть 2: учебник для академического бакалавриата / И. П. Копылов. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 276 с. – ISBN 978-5-534-08702-4.
34. **Королёв, Н. А.** Мониторинг и оценка остаточного ресурса машин переменного тока с использованием комплексного анализа вибрационных и электрических параметров / **Н. А. Королёв** // 70-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ» 2016: Сборник научных трудов. – Москва. – 2016. – С.23.
35. **Королёв, Н. А.** Оценка технического состояния и остаточного ресурса машин переменного тока с использованием комплексного анализа вибрационных и электрических параметров / **Н. А. Королёв** // 71-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ» 2017: Сборник научных трудов. – Москва. – 2017. – С.30.
36. **Королёв, Н. А.** Система диагностики электродвигателя переменного тока на основе комплексного параметрического анализа / **Н. А. Королёв** // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: Сборник научных трудов. – Пермь. – 2016. – С. 236-242.

37. **Королёв, Н. А.** Система управления электроприводом нагнетательных вентиляторов и сетевого насоса для поддержания теплового режима в шахтных стволах. / **Н. А. Королёв**, Е. М. Васильев, А. В. Николаев // Горное оборудование и электромеханика, Москва. – 2015. – № 1. – С. 20-24.
38. **Королёв, Н.А.** Оценка вероятности дефекта асинхронного двигателя на основе комплексного метода диагностики / **Н. А. Королёв** // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: Сборник научных трудов. – Пермь. – 2017. – С.60-67.
39. **Королёв, Н.А.** Повышение информативности системы диагностики по потребляемому току асинхронного электропривода / **Н. А. Королёв** // 74-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ» 2020: Сборник научных трудов. – Москва. – 2020. – С.116-117.
40. Куприянов, И. С. Математическое моделирование параметров асинхронных двигателей при электрических дефектах ротора / И. С. Куприянов, И. О. Бельский, А. В. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – №. 3 (63). – С. 154-163.
41. Лезнов, Б. С. Энергосберегающий регулируемый электропривод и укрупнение единичной мощности насосных агрегатов / Б. С. Лезнов // Энергосбережение средствами электропривода. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 80 с.
42. Новожилов, Н. Г. Структура и алгоритмы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом при провалах напряжения в электрической сети: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Новожилов Никита Геннадьевич; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2017. – 200 с.
43. Обухов, С. Г. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С. Г. Обухов, Е. Е. Чаплыгин, Д. Е. Кондратьев // Электричество. – 2008. – № 7. – С. 23-31.

44. Онищенко, Г. Б. Проблемы и перспективы развития электропривода / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юньков // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2014. – С. 6-13.
45. Патент № 181087 Российская Федерация. Устройство диагностики двигателей переменного тока с преобразователем частоты / Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королёв**, Б. Ю. Васильев: правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 181087; заявл. 19.10.2017; опубл. 04.07.2018, бюл. № 19 – 8 с.: ил.
46. Патент № 2626231 Российская Федерация. Способ диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королёв**, И.С. Бабанова: правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2016144271; заявл. 10.11.2016; опубл. 24.07.2017, бюл. № 21 – 16 с.: ил.
47. Патент № 2648413 Российская Федерация. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата / Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королёв**, И. С. Бабанова: правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2017101942; заявл. 20.01.2017; опубл. 27.03.2018, бюл. № 9 – 16 с.: ил.
48. Патент № 2727386 Российская Федерация. Устройство диагностики и оценки остаточного ресурса электродвигателей / Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королёв**, Б.Ю. Васильев, Н.О. Желтиков; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 181087; заявл. 19.10.2017; опубл. 21.07.2020, бюл. № 21 – 9 с.: ил.

49. Пашали, А. А. Экспертная система диагностики электроцентробежных насосов / А. А. Пашали, М. Г. Волков, А. В. Жонин // Экология. – 2009. – Т. 7. – № 1. – 117-120 с.
50. Попадько, В. Е. Разработка учебного программно-технического комплекса для исследования алгоритмов автоматической настройки регуляторов / В. Е. Попадько, Р. Л. Барашкин, П. К. Калашников, Д. К. Данилов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 8. – С. 63-68.
51. Пронин, М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов / под ред. Е. А. Крутякова. – СПб.: Электросила, 2003. – 172 с.
52. Пронин, М. В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов / под редакцией Крутякова Е.А. – СПб.: Электросила, 2004 г. – 252 с.: ил.
53. Решетняк, С. Н., Фащиленко В. Н., Федоров О. В. Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России / С. Н. Решетняк, В. Н. Фащиленко, О. В. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №. 6. – С. 331-334.
54. Русов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – 2012.
55. Русов, В.А. Диагностика, прогнозирование и управление эксплуатацией роторного оборудования на основе информации от систем мониторинга / В. А. Русов // Диагностирование и прогнозирование технического состояния оборудования электростанций. – 2020. – С. 26-38.
56. Саушев, А. В. Аналитическое описание областей работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев // Вестник государственного

университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2009. – № 4 (4). – С. 34-41.

57. Саушев, А. В. Области работоспособности электротехнических систем: монография / А. В. Саушев // СПб.: Политехника, 2013. – 412 с.

58. Саушев, А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта: монография / А. В. Саушев // СПб.: ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2015. – 215 с.

59. Сафин, Н. Р. Токовая диагностика неисправностей подшипников асинхронных двигателей на основе метода Парка / Н. Р. Сафин, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский // Электротехника. Энергетика. Машиностроение. – 2014. – С. 50-56.

60. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614351. Российская Федерация. Генератор электрических и вибрационных сигналов электрической машины переменного тока для технической диагностики и оценки остаточного ресурса / Ю. Л. Жуковский, Н. И. Котелева, **Н. А. Королев**: правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2017614351; заявл. 27.02.2017; зарегистр. 12.04.2017; опубл. 12.04.2017 – 2 с.

61. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615940. Российская Федерация. Программа для определения оптимальных параметров систем управления асинхронного двигателя электропривода с преобразователем частоты / Ю. Л. Жуковский, **Н. А. Королев**, Б.Ю. Васильев: правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2020615940; заявл. 18.05.2020; зарегистр. 04.06.2020; опубл. 04.06.2020 – 1 с.

62. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов / Соколовский Г.Г. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

63. Сушко, А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сушко Андрей Евгеньевич; Моск. гос. инженерно-физ. ин-т. – Москва, 2007. – 170 с.
64. Татаринов, Д. Е. Обеспечение электромагнитной и электромеханической совместимости в электротехнических комплексах с асинхронными электроприводами / Татаринов Денис Евгеньевич; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2017. – 160 с.
65. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
66. Фащиленко, В. Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие / В. Н. Фащиленко. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 260 с.: ил.
67. Хальясмаа, А. И. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: Учебное пособие / А. И. Хальясмаа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.
68. Чаплыгин, Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. Учебное пособие / Е. Е. Чаплыгин. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 56 с.
69. Alarcon, G. A simple algorithm for a digital three-pole Butterworth filter of arbitrary cut-off frequency: application to digital electroencephalography / G. Alarcon, C. N. Guy, C. D. Binnie // *Journal of Neuroscience Methods*. – 2000. – Т 104. – № 1. – С. 35-44. DOI: 10.1016/S0165-0270(00)00324-1.
70. Anwari, M. New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under-and overvoltage unbalance / M. Anwari, A. Hiendro // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2010. – Т 25. – № 3. – С. 619-625. DOI: 10.1109/TEC.2010.2051548.

71. Aziz, A. B. Исследование энергетических свойств преобразователя частоты типа F7 Омрон / A. B. Aziz., A. I Jaber // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. – 2019. – С. 38-43.
72. Bessous, N. Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform / N. Bessous, S. Zouzou, W. Bentrah, S. Sbaa, M. Sahraoui // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2018. – Т 9(2). –335-343. DOI: 10.1007/s13198-016-0459-6.
73. Bonnet, A. H. Cause and Analis of Stator and Rotor in Three-Phase Squirrel Induction Motor / A. H. Bonnet , G. C. Soukup // IEEE Transaction on Industie Application, 1992. – Т 28(4). – С. 921-937. DOI: 10.1109/PAPCON.1991.239667.
74. Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. – Prentice Hall, 2002. – 711 с. ISBN: 0130016743.
75. Bose, B. K. Power electronics and motor drives / B. K. Bose. – Elsevier, 2008. – 935 с. ISBN: 9780128238677.
76. Botha, M. M. Electrical machine failures, causes and cures / M. M. Botha // 1997 eighth international conference on electrical machines and drives (Conf. Publ. No. 444). – IET, 1997. – С. 114-117. DOI: 10.1049/cp:19971049
77. Cardoso, A. J. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by Park's vector approach / A. J. Cardoso, E. S. Saraiva // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1993. – Т 29. – № 5. – С. 897-901. DOI: 10.1109/28.245712.
78. Cardoso, A. J. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach / A. J. Cardoso, S. M. Cruz, D. S. Fonseca // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Т 14. – № 3. – С. 595-598. DOI: 10.1109/60.790920.
79. Ceban, A. Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis / A. Ceban, R. Pusca, R. Romary //IEEE Transactions on industrial electronics. – 2011. – Т. 59. – №. 5. – С. 2082-2093. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163285.

80. Crescentini, M. Bandwidth limits in Hall effect-based current sensors / M. Crescentini, M. Marchesi, A. Romani, M. Tartagni, P. A. Traverso // *Acta-Imeko*. – 2017. – T 6. – № 4. – C. 17-24. DOI: http://dx.doi.org/10.21014/acta_imeko.v6i4.478.
81. Cruz, S. M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach / S. M. Cruz. A. J. Cardoso // *IEEE Transactions on industry applications*. – 2001. – T 37. – № 5. – C. 1227-1233. DOI: [10.1109/28.952496](https://doi.org/10.1109/28.952496).
82. Cunningham, P. k-Nearest neighbour classifiers-A Tutorial / P. Cunningham, S. J. Delany // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. – 2021. – T. 54. – №. 6. – C. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.1145/3459665>.
83. Diab, A. A. Optimal design and control of MMC STATCOM for improving power quality indicators / A. A. Diab, T. Ebraheem, R. Aljendy, H. M. Sultan, Z. M. Ali // *Applied Sciences*. – 2020. – T 10. – № 7. – C. 2490. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072490>.
84. Evgeniou, T. Support vector machines: Theory and applications / T. Evgeniou, M. Pontil // *Advanced Course on Artificial Intelligence*. – Springer, Berlin, Heidelberg. – 1999. – C. 249-257. https://doi.org/10.1007/3-540-44673-7_1.
85. Ewert, P. Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach / P. Ewert, C. T. Kowalski, T. Orłowska-Kowalska // *Electronics*. – 2020. – T 9. – № 9. – C. 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9091334>.
86. Fournier, E. Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine using spectral kurtosis with reference / E. Fournier, A. Picot, J. Regnier, M. T. Yamdeu, J. M. Andréjak, P. Maussion // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2014. – T 62. – №. 3. – C. 1879-1887. DOI: [10.1109/TIE.2014.2341561](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2341561).
87. Frosini, L. Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors / L. Frosini, E. Bassi // *IEEE*

Transactions on Industrial electronics. – 2009. – T 57. – № 1. – C. 244-251. DOI: 10.1109/TIE.2009.2026770.

88. Ghoggal, A. An improved model of induction motors for diagnosis purposes–Slot skewing effect and air–gap eccentricity faults / A. Ghoggal, S. E. Zouzou, H. Razik,. M. Sahraoui, A. Khezzar // Energy conversion and Management. – 2009. – T 50. – № 5. – C. 1336-1347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.003>.

89. Glowacz, A. Diagnostics of DC and induction motors based on the analysis of acoustic signals //Measurement Science Review. – 2014. – T 14. – № 5. – C. 257<https://doi.org/10.2478/msr-2014-0035>.

90. Grigor'ev, M. A. Synthesis of electric drives realizing limit operating regimes in terms of operation speed and overload capacity / M. A. Grigor'ev // Russian Electrical Engineering. – 2015. – T 86. – № 12. – C. 694-696. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371215120093>

91. Gundewar, S.K. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor / S.K. Gundewar, P.V. Kane // Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2021. – T 9. – № 4. – C. 643-674. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>.

92. Gyftakis K.N. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number / K.N. Gyftakis, A.J. Cardoso, J.A. Antonino-Daviu, // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – T 93. – C 30-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.046>.

93. Jung J. H. Online diagnosis of induction motors using MCSA / J. H. Jung, J. J. Lee, B. H. Kwon // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – T 53. – № 6. – C. 1842-1852. 10.1109/TIE.2006.885131.

94. Kiselichnik O. I. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter / O. I. Kiselichnik, M. Bodson // Russian Electrical Engineering. – 2011. – T 82. – № 2. – C. 69-75.. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371211020088>

95. **Korolev, N. A.** AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis / **N.A. Korolev, S.V. Solovev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 177. – №. 1. – С. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012007
96. **Korolev, N. A.** Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter / **N.A. Korolev, S.V. Solovev, Y.L. Zhukovskiy** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т 643. – № 1. – С. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012022.
97. **Korolev, N.** Monitoring the technical condition of autonomous electrical systems with electric drive / **N. Korolev, S. Solovev** // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences – 2019. – Т 140. – С. 04015. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004015.
98. Li, Z. A novel drive circuit with overcurrent protection for solid state pulse generators / Z. Li //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – Т 26. – № 2. – С. 361-366. DOI: 10.1109/TDEI.2018.007701.
99. LIU L., ÖZSU M.T. Encyclopedia of Database Systems / L. LIU, M.T. ÖZSU. – New York, NY, USA: Springer, 2009. – Т. 6. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_2445
100. Machine consciousness: Big data analytics and the Internet of Things. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://arstechnica.com/information-technology/2015/03/machine-consciousness-big-data-analytics-and-the-internet-of-things>. Дата обращения: 18.05.2018
101. Novozhilov, N. G. Assessment of duration of the drive operation in the mode of kinetic energy recovery under power supply voltage sags in electrical grids of mechanical engineering enterprises/ N. G. Novozhilov, O. B. Shonin, S. B. Kryltcov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т 177. – № 1. – С. 012142. 10.1088/1757-899X/177/1/012142
102. Novozhilov, N.G. Digital algorithm for fast detecting and identifying the asymmetry of voltages in three-phase electric grids of mechanical engineering facilities./ N.G. Novozhilov, O.B. Shonin, S.B. Kryltcov // IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – T 177. – №. 1. – C. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012011.

103. Petruk, O. Sensitivity and offset voltage testing in the hall-effect sensors made of graphene / O. Petruk, R. Szewczyk, T. Ciuk, W. Strupiński, J. Salach, M. Nowicki // Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques. – Springer, Cham, 2014. – C. 631-640. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05353-0_60.

104. Rodríguez, P. V. Air-gap force distribution and vibration pattern of induction motors under dynamic eccentricity / P. V. Rodríguez, A. Belahcen, A. Arkkio, A. Laiho, J. A. Antonino-Daviu // Electrical engineering. – 2008. – T. 90. – №. 3. – C. 209-218. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-007-0066-2>.

105. Sankaranarayanan, S. Data Flow and Distributed Deep Neural Network based low latency IoT-Edge computation model for big data environment / S. Sankaranarayanan, J.J.P.C Rodrigues, V. Sugumaran, S. Kozlov // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – T 94. – C. 103785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103785>.

106. Sharifi, R. Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring / R. Sharifi, M. Ebrahimi // SA transactions. – 2011. – T 50. – № 1. – C. 14-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.10.008>

107. Stone, G.C. Developing of Automatic, Continuous Partial Discharge Monitoring System of Detect Motor and Generator Partial Discharges / G. C Stone, B. A Floyd, S. R. Campbell, H. G. Sedding // 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record. – IEEE, 1997. – C. MA2/3.1-MA2/3.3. 10.1109/IEMDC.1997.604065.

108. Thomson, W. T. Current signature analysis to detect induction motor faults / W. T. Thomson, M. Fenger // IEEE Industry Applications Magazine. – 2001. – T. 7. – № 4. – C. 26-34. DOI: 10.1109/2943.930988.

109. Thomson, W. T. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis / W. T. Thomson, M. Fenger, B. A. LLoyd. //

Cement Industry Technical Conference 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003. – IEEE, 2003. – C. 37-46.

110. Toma, R. N. Bearing fault diagnosis of induction motors using a genetic algorithm and machine learning classifiers / R. N. Toma, A. E. Prosvirin, J. M. Kim // *Sensors*. – 2020. – T 20. – № 7. – C. 1884. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20071884>.

111. Uddin, J. Reliable fault classification of induction motors using texture feature extraction and a multiclass support vector machine / J. Uddin, M. Kang, D. V. Nguyen, J. M. Kim // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – T 2014. 10.1155/2014/814593.

112. Ugwiri, M. A. Vibrations for fault detection in electric machines / M. A. Ugwiri, I. Mpia, A. Lay-Ekuakille // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. – 2020. – T 23. – № 1. – C. 66-72. DOI: 10.1109/MIM.2020.8979527.

113. Vathoopan, M., Johny, M., Zoitl, A., Knoll, A. Modular fault ascription and corrective maintenance using a digital twin / M. Vathoopan, M. Johny, A. Zoitl, A. Knoll // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – T 51. – № 11. – C. 1041-1046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.470>.

114. Vlad, I. Aspects regarding optimal design of high power squirrel cage asynchronous motors / I. Vlad, A. Campeanu, S. Enache, M. A. Enache // 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). – IEEE, 2012. – C. 503-508. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231772.

115. Ye, Z. Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition / Z. Ye, B. Wu, A. Sadeghian // *IEEE transactions on industrial electronics*. – 2003. – T 50. – № 6. – C. 1217-1228. DOI: 10.1109/TIE.2003.819682.

116. Zhukovskiy, Y. About increasing informativity of diagnostic system of asynchronous electric motor by extracting additional information from values of consumed current parameter / Y. Zhukovskiy, N. Korolev, N. Koteleva // *Journal*

of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – T. 1015. – №. 3. – C. 032158. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032158.

117. Zhukovskiy, Y.L. Asynchronous motor drive operability field with two-link structure of frequency converter / Y.L. Zhukovskiy, **N. Korolev**, I. Filatova // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – T. 1661. – №. 1. – C. 012127. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012127.

118. Zhukovskiy, Y.L. Diagnostics of an asynchronous motor powered from a self-commutated voltage inverter / Y.L. Zhukovskiy, **N.A. Korolev**, N.I. Koteleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – T. 560. – №. 1. – C. 012171. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012171.

119. Zhukovskiy, Y.L. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / Y.L. Zhukovskiy, **N.A. Korolev**, I.S. Babanova, A.V. Boikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – T. 87. – №. 3. – C. 03205.

120. Zhukovskiy, Y.L. The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics / Y.L. Zhukovskiy, **N.A. Korolev**, I.S. Babanova, A.V. Boikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – T. 87. – №. 3. – C. 032055. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032055.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Границы амплитудных значений частотных составляющих тока

Таблица А.1 – Границы амплитудных значений частотных составляющих тока

Узел	Дефект	Частота дефекта	Диапазон частот f_d дефекта Гц	Скалярная СУ				Векторная СУ				Диапазон ошибки частоты Δf_d Гц
				Порог обнаружения А, Дб	Предельное значение А, Дб	Предельно-допустимое значение А, Дб	Допустимое значение А, Дб	Порог обнаружения А, Дб	Предельное значение А, Дб	Предельно-допустимое значение А, Дб	Допустимое значение А, Дб	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Статор	Межвитковые замыкания в обмотках статора	f_{d11}	70÷300	-64,0	-29,0	-30,0	-46,8	-64,0	-29,0	-36,0	-56,2	±0,8
	Асимметрия статора	f_{d12}	900÷1200	-75,0	-45,0	-50,6	-63,0	-75,0	-45,0	-60,7	-75,6	±0,4
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30÷70	-63,1 -65,1	-25,0	-26,2 -30,2	-44,6 -47,7	-63,1 -65,1	-25,0	-31,4 -36,2	-53,5 -57,2	±1,2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	-57,0	x	x	x	-57,0	x	x	x	x
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d31}	400÷2500	-62,1 -62,3	-23,0 -23,0	-24,2 -24,7	-43,2 -43,5	-62,1 -62,3	-23,0 -23,0	-29,0 -29,6	-51,8 -52,2	±1,5
	Динамический эксцентриситет воздушного зазора	f_{d32}		-70,2 -66,9	-24,0 -26,6	-43,6 -44,7	-62,4 -63,1	-70,2 -66,9	-24,0 -26,6	-52,3 -53,6	-74,9 -75,7	±1,5
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80÷140	-68,0	-35,0	-36,0	-52,0	-68,0	-35,0	-43,2	-62,4	±0,5
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-70,2	-39,0	-40,4	-55,3	-70,2	-39,0	-48,5	-66,4	±0,5
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-69,1	-31,0	-32,5	-49,4	-69,1	-31,0	-39,0	-59,3	±0,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технические характеристики оборудования лабораторного стенда

1. Технические характеристики преобразователь частоты ATV900 Schneider Electric:

Технические характеристики продукта

Спецификации



Преобразователь частоты ATV930 2,2кВт 380В 3ф

ATV930U22M3

Код EAN : 3606480883569

Основные характеристики

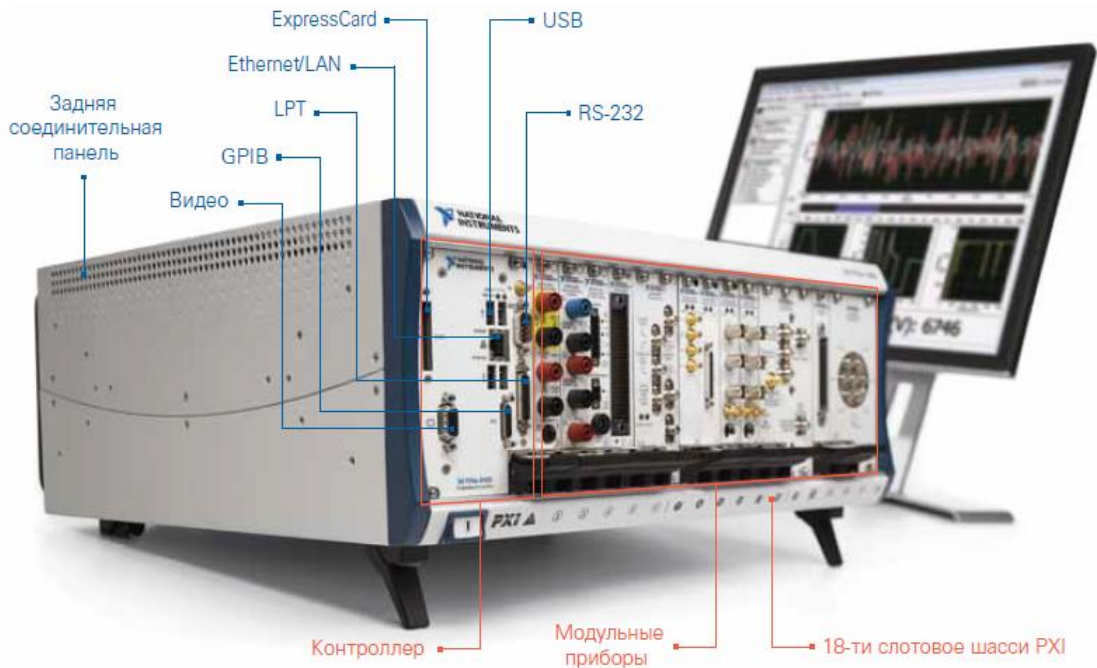
Серия	Altivar Process ATV900
Область применения	Промышленное использование
Тип продукта	Привод с регулируемой частотой вращения
Назначение продукта	Асинхронные электродвигатели Синхронные двигатели
Исполнение	С тормозным прерывателем Стандартное исполнение
Число фаз сети	3 фазы
Исполнение монтажа	Для монтажа на стену
Протокол порта обмена данными	Modbus serial Ethernet/IP Modbus TCP
[Us] номинальное напряжение сети	380...400 В - 15...10 %
Непрерывный выходной ток	11,2 А в 4 kHz для нормальной нагрузки 8 А в 4 kHz для тяжелых условия
Степень защиты IP	IP21
Оptionальный модуль	Слот A: модуль соединения для Profibus DP V1 Слот A: модуль соединения для Profinet Слот A: модуль соединения для DeviceNet Слот A: модуль соединения для EtherCAT Слот A: модуль соединения для шлейф CANopen RJ45 Слот A: модуль соединения для CANopen SUB-D 9 Слот A: модуль соединения для CANopen винтовые зажимы Слот A/слот B/слот C: модуль расширения с дискретными и аналоговыми вх/вых Слот A/слот B/слот C: модуль расширения выходных реле Слот B: 5/12 В интерфейсная плата для цифрового энкодера Слот B: интерфейсная плата для аналогового энкодера Слот B: интерфейсная плата для резольвера модуль соединения для Ethernet Powerlink

Дополнительные характеристики

Количество дискретных входов	10
Тип дискретного входа	D1...D8 программируемый, 24 V пост. тока (<= 30 V), полное сопротивление: 3.5 кОм D17, D18 программируемый в качестве импульсного входа: 0...30 кГц, 24 V пост. тока (<= 30 V) STOA, STOB безопасное выключение крутящего момента, 24 V пост. тока (<= 30 V), полное сопротивление: > 2,2 кОм
Количество предустановленных скоростей	16 предустановленных скоростей
Количество дискретных выходов	2
Тип дискретного выхода	Логический выход DQ+ 0...1 кГц <= 30 V пост. ток 100 мА Программируется как импульсный выход DQ+ 0...30 кГц <= 30 V пост. ток 20 мА

Отказ от ответственности: Данный документ не означает необходимости определения пригодности этих продуктов для конкретных задач и не может служить для конкретных применений и не может служить для такого определения.

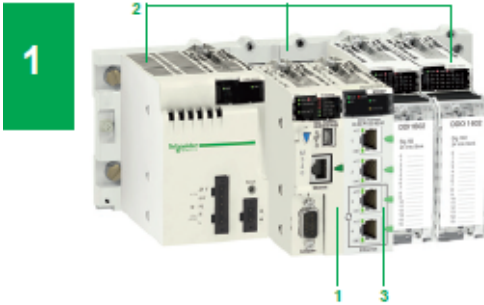
2. Технические характеристики высокопроизводительной модульной платформы NI PXI-1042Q.



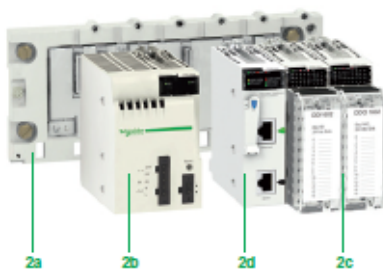
- Открытая модульная архитектура
- Более 1500 измерительных модулей (от постоянного тока до 26.5 ГГц)
- До 17 измерительных модулей в одном шасси
- Возможность синхронизации как модулей, так и отдельных шасси
- Надежный форм-фактор
- Стандартные компьютерные технологии и интерфейсы ввода/вывода
- Полная совместимость платформ PXI/PXI Express и CompactPCI
- Пропускная способность: до 4 ГБ/с - каждого слота для подключения модулей, до 12 ГБ/с - слота системного контроллера
- Разработка детерминированных приложений под управлением ОС реального времени
- Программирование в NI LabVIEW, NI LabWindows/CVI, Measurement Studio, .NET, Visual Basic, C/C++

3. Технические характеристики контроллера M340 *Schneider Electric*.

Modicon M340 automation platform Composition



Modicon M340 automation platform comprising:
- BMXP34 type processors,
- A single-rack or multi-rack Modicon X80 I/O platform,
- Additional dedicated modules.



Modicon X80 I/O platform

Presentation

The Modicon M340 automation platform comprises:

- 1 BMXP34 dedicated processors
- 2 A Modicon X80 I/O platform, in a single-rack or multi-rack configuration
- 3 Additional modules for various applications (application-specific, Ethernet communication, etc.)

Modicon M340 processors

Seven processor models comprising 1 Standard model (BMXP341000) and 6 Performance models (BMXP3420●●● or BMXP3420●●●CL) with different memory capacities, processing speeds, number of I/O and number and type of communication ports.

Depending on the model, they offer a maximum (non-cumulative) of:

- 512 to 1024 discrete I/O
- 128 to 256 analog I/O
- 20 to 36 application-specific channels (1) (process counter, motion control and serial link, or RTU)
- 0 to 3 Ethernet Modbus/TCP or Ethernet/IP networks (with or without integrated port and 2 network modules maximum)
- 4 "Full Extended master" AS-Interface V3 actuator/sensor buses, profile M4.0

Depending on the model, Modicon M340 processors include:

- A 10BASE-T/100BASE-TX Ethernet Modbus/TCP port
- A CANopen machine and installation bus port
- A Modbus or Character mode serial link port

Each processor has a USB TER port (for connecting a programming terminal or a Magelis GTO, GTW, STU/STO, etc. HMI terminal) (2).

It is supplied with a memory card (3) that enables:

- Backing up the application (program, symbols and constants)
- Activating a standard Web server for the Transparent Ready class B10 integrated Ethernet port (depending on the model)

Depending on the model, this memory card can be replaced by another type of memory card (to be ordered separately) that supports:

- Backing up the application and activation of the standard Web server (same as other card)
- An 8 MB or 128 MB storage area, depending on the option card, for storing additional data organized in a file system (directories and sub-directories)

Modicon X80 I/O platform and additional modules (4)

The "Modicon X80 I/O" platform, which can be used "In Rack" and/or in a remote I/O (RIO) drop depending on the type of automation platform (Modicon M340, Quantum, etc.), comprises the following elements:

- Racks with 4, 6, 8 or 12 slots (2a)
- Power supply modules, --- or ~ (2b)
- Discrete and analog I/O modules (2c)
- RTU (Remote Terminal Unit), serial link, AS-Interface, etc. communication modules (2d)

Additional dedicated modules for the Modicon M340 automation platform that can be used on "Modicon X80 I/O" are also available:

- Application-specific
- Ethernet (Modbus/TCP, Ethernet/IP) communication module

External modules, such as Modbus Plus, Profibus DP/PA communication as well as modules offered as part of CAPP (Collaboration Automation Partner Program), are also available.

Treatment for severe environments

Using the "ruggedized" modules enables the Modicon M340 automation platform to be used in severe environments or at operating temperatures from -25°C/-13°F to +70°C/158°F. See pages 3/2 to 3/3.

(1) Maximum number of application-specific channels per station. Only the application-specific channels actually configured in the Unity application count.

(2) For details of the Magelis offer please visit our website www.schneider-electric.com.

(3) With the exception of 2 models supplied without memory card (see page 1/13).

(4) For further information, please consult our "Modicon X80 I/O platform" catalog available on our website www.schneider-electric.com.

4. Технические характеристики высокочастотного АЦП PXI-6251:

Программное обеспечение

Программное обеспечение (драйвер) “NI-DAQmx” служит для управления режимами работы модулей, его метрологически значимая часть предназначена для задания и измерения значений величин.

Драйвер устанавливается на компьютер (контроллер).

Уровень защиты программного обеспечения от непреднамеренных и преднамеренных изменений «низкий» по Р 50.2.077-2014.

Идентификационные данные программного обеспечения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Идентификационные данные программного обеспечения

Идентификационные данные (признаки)	Значение
Идентификационное наименование	NI-DAQmx
Номер версии (идентификационный номер)	не ниже 9.2.0

Метрологические и технические характеристики

Метрологические и технические характеристики представлены в таблицах 2 – 4.

Таблица 2 – Тип интерфейса, количество каналов, частота дискретизации

Модуль	Интерфейс	Количество каналов		Максимальная частота дискретизации, Гц ²⁾	
		АЦП ¹⁾	ЦАП	АЦП	ЦАП
NI 6221	PXI, USB	16	2	$2,5 \cdot 10^5$	$8,33 \cdot 10^5$
NI 6251	PXI, PXIe, USB	16	2	$1,25 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^6$
NI 6255	PXI, USB	80	2	$1,25 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^6$
NI 6259	PXI, PXIe, USB	32	4	$1,25 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^6$
NI 6281	PXI, USB	16	2	$6,25 \cdot 10^5$	$2,86 \cdot 10^6$
NI 6343	USB	32	4	$5 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$
NI 6356	PXIe, USB	8 ³⁾	2	$1,25 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$
NI 6363	PXIe, USB	32	4	$2 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^6$
NI 6366	PXIe, USB	8 ³⁾	2	$2 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$
NI 6368	PXIe	16 ³⁾	4	$2 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$

1) Однополярное подключение. При дифференциальном подключении количество каналов вдвое меньше.
 2) На один канал, при работе большего количества каналов значение уменьшается.
 3) Только дифференциальное подключение.

Таблица 3 – Основные метрологические характеристики

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ (АЦП)	
Диапазоны измерения напряжения, В	
NI 6221, NI 6343	$\pm 0,2; \pm 1; \pm 5; \pm 10$
NI 6251, NI 6255, NI 6259, NI 6281, NI 6363	$\pm 0,1; \pm 0,2; \pm 0,5; \pm 1; \pm 2; \pm 5; \pm 10$
NI 6356, NI 6366, NI 6368	$\pm 1; \pm 2; \pm 5; \pm 10$
Входной импеданс	
NI 6221, NI 6251, NI 6255, NI 6259, NI 6281, NI 6343, NI 6363	$>10 \text{ ГОм} / 100 \text{ пФ}$
NI 6356, NI 6366, NI 6368	$>100 \text{ ГОм} / 10 \text{ пФ}$

5. Технические характеристики асинхронного двигателя: серии АИР 80 В4:

Таблица Б.1. Параметры двигателей.

Усл. обозн	Наименование	Мощность Рном, кВт	Ток, Iном, А	n об/мин	Cos_fi	КПД, %	λ	Kp	Ki
АД №2	АИР 80 В4	1.50	3.60	1390	0.80	78.7	2.3	2.3	6.2

Примечание: Уном= 380 В, подключены по схеме звезда; λ – перегрузочная способность, Kp – кратность пускового момента; Ki – кратность пускового тока.

Таблица Б.2. Параметры схемы замещения двигателей.

Усл. обозн	Наименование	Ls, Гн	Lr, Гн	Lm, Гн	Rs	Rr
АД №2	АИР 80 В4	0.8282	0.8353	0.8071	7.2652	4.0851

Примечание: L_s – индуктивность намагничивания статора, Гн; L_r – индуктивность намагничивания ротора, Гн; L_m – взаимная индуктивность намагничивания, Гн; R_s – активное сопротивление статора, Ом; R_r – активное сопротивление ротора, Ом.

6. Технические характеристики датчика тока на эффекте Холла.

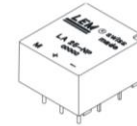


Технический паспорт

$I_{PN} = 5-6-8-12-25 \text{ A}$

Датчик тока LA 25-NP/SP44

Для электронного преобразования токов: постоянного, переменного, импульсного и т.д. в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.



Отличительные особенности

- Многодиапазонный датчик в зависимости от способа подключения первичных шин на печатной плате
- Компенсационный датчик тока на эффекте Холла
- Изолирующий пластиковый негорючий корпус, UL 94-V0

Преимущества

- Отличная точность
- Хорошая линейность
- Низкий температурный дрейф
- Оптимальное время отклика
- Широкий частотный диапазон
- Высокая помехозащитность
- Высокая перегрузочная способность.

Применение

- Частотно-регулируемые приводы переменного тока
- Статические преобразователи постоянного тока
- Системы управления работой аккумуляторных батарей
- Источники бесперебойного питания (ИБП)
- Импульсные источники питания
- Источники питания для сварочных агрегатов.

Область применения

- Транспорт.

Электрические параметры

I_{PI}	Номинальный входной ток, эфф. знач.	25 ¹⁾	А-вит
I_P	Диапазон преобразования	0... ± 36	А-вит
R_M	Величина нагрузочного резистора при ± 15 В	и ± 25 А-вит _{max}	R_{Mmin} 150 R_{Mmax} 325 Ом
		и ± 36 А-вит _{max}	150 190 Ом
I_{SN}	Номинальный аналоговый выходной ток	25	мА
K_H	Коэффициент преобразования	1-2-3-4-5 : 1000	
U_C	Напряжение питания (± 5 %)	± 15	В
I_C	Ток потребления	10 + I_S	мА

Точностно-динамические характеристики

X	Погрешность преобразования при I_{PI} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.6	%
ε_L	Нелинейность	Средн	Макс
		± 0.05	± 0.15
I_D	Начальный выходной ток при $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.05	± 0.15 мА
I_{OM}	Ток смещения ²⁾ при $I_p = 0$, после перегрузки 3 x I_{PI}	± 0.05	± 0.15 мА
I_{OT}	Температурный дрейф I_D , при - 40 °C .. + 85 °C	± 0.25	± 0.70 мА
t_t	Время отклика ³⁾ до 90 % от I_{Pmax}	< 1	мкс
di/dt	Точность следования di/dt	> 50	А/мкс
BW	Частотный диапазон (- 1 дБ)	0 .. 150	кГц

Справочные данные

Климатическое исполнение У, категория размещения 2 (ГОСТ 15150-69)		
T_A	Рабочая температура	- 40 .. + 85 °C
T_S	Температура хранения	- 50 .. + 100 °C
R_p	Сопротивление первичной цепи (на виток) при $T_A = 25^\circ\text{C}$	< 1.25 мОм
R_s	Выходное сопротивление (катушки) при T_Amax	115 Ом
R_{is}	Сопротивление изоляции при 500 В, $T_A = 25^\circ\text{C}$	> 1500 МОм
m	Вес	22 г
	Стандарты	КНДР.20104.001ПМИ
	Код LEM	69.08.19.044.0
	Свидетельство об утверждении типа средств измерения	СН.С.34.004.А №54786

Примечание: ¹⁾ См. схему соединения первичных витков.

²⁾ Результат намагничивания магнитопровода.

³⁾ При di/dt = 100 А/мкс.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программный код алгоритмов

```

filename='G:\Диссертация\programm\Исп2_01.04.21_1460.3_испр.csv'
%% Запись тока
IA=readmatrix(filename, 'Range', 'B3:B500002');
IB=readmatrix(filename, 'Range', 'C3:C500002');
IC=readmatrix(filename, 'Range', 'D3:D500002');
%% Запись напряжения
UA=readmatrix(filename, 'Range', 'E3:E500002');
UB=readmatrix(filename, 'Range', 'F3:F500002');
UC=readmatrix(filename, 'Range', 'G3:G500002');
T = readmatrix(filename, 'Range', 'A3:A500002'); % Массив
отсчетов времени
%% Фильтрация 1 этап
L = size(T', 1); % Длина сигнала
Tm = T(L) - T(1); % Длина сигнала, с
FS = 0.25/(T(2) - T(1)); % Частота дискретизации исходного
сигнала, Гц
order = 4; % Порядок фильтра
Fc = 1024; % Частота среза, Гц
h = fdesign.lowpass('N,F3dB', order, Fc, FS);
Hd = design(h, 'butter'); % В качестве ФНЧ выступает фильтр
Баттерворта
%% Обобщенный вектор напряжения
Us=(2/3)*(UA+UB*(-1/2+i*sqrt(3)/2)+UC*(-1/2-i*sqrt(3)/2));
ud=sqrt(2/3)*UA-1/sqrt(6)*UB-1/sqrt(6)*UC;
uq=1/sqrt(2)*UB-1/sqrt(2)*UC;
Us=ud+uq*i
Us_max=max(Us);
Us=Us/Us_max
ud=real(Us)
uq=imag(Us)
VU=sqrt(ud.^2+uq.^2); % Модуль вектора напряжения
%% Обобщенный вектор тока
Is=(2/3)*(IA+IB*(-1/2+i*sqrt(3)/2)+IC*(-1/2-i*sqrt(3)/2));
id=sqrt(2/3)*IA-1/sqrt(6)*IB-1/sqrt(6)*IC;
iq=1/sqrt(2)*IB-1/sqrt(2)*IC;
Is=id+iq*i;
Is_max=max(Is);
Is1=Is/Is_max
id=real(Is)
iq=imag(Is)
VI=sqrt(id.^2+iq.^2); % модуль вектора тока
%% Фильтрация 2 этап
iaf = filter(Hd, IA);
ibf = filter(Hd, IB);
icf = filter(Hd, IC);
isf = filter(Hd, Is);
usf = filter(Hd, Us);
vif = filter(Hd, VI);
vuf = filter(Hd, VU);
%% Спектральный анализ

```



```

[ia,frec]=norm_fft(iaf,T);
[ib,frec]=norm_fft(ibf,T);
[ic,frec]=norm_fft(icf,T);
[ua,frec]=norm_fft(UA,T);
[ub,frec]=norm_fft(UB,T);
[uc,frec]=norm_fft(UC,T);
[is,frec]=norm_fft(isf,T);
[us,frec]=norm_fft(usf,T);

[vi,frec]=norm_fft(vif,T);
[vu,frec]=norm_fft(vuf,T);
function [S,f]=norm_fft(iaf,T) % Расчёт спектральной плотности в
нормальном масштабе
    ff=fft(iaf); % Быстрое преобразование Фурье
    N=length(T); % Размер массива времени
    tmax=max(T); % Максимальное время
    f=(0:(N/2))./tmax; % Расчёт частот спектра
    n=length(f); % Число частот спектра
    k=(N/2); % Расчёт масштаба амплитуд
    S=abs(ff(1:n))/k; % Корректировка спектра
end
function [S,f]=norm_fft(ibf,T) % Расчёт спектральной плотности в
нормальном масштабе
    ff=fft(ibf); % Быстрое преобразование Фурье
    N=length(T); % Размер массива времени
    tmax=max(T); % Максимальное время
    f=(0:(N/2))./tmax; % Расчёт частот спектра
    n=length(f); % Число частот спектра
    k=(N/2); % Расчёт масштаба амплитуд
    S=abs(ff(1:n))/k; % Корректировка спектра
end
function [S,f]=norm_fft(icf,T) % Расчёт спектральной плотности в
нормальном масштабе
    ff=fft(icf); % Быстрое преобразование Фурье
    N=length(T); % Размер массива времени
    tmax=max(T); % Максимальное время
    f=(0:(N/2))./tmax; % Расчёт частот спектра
    n=length(f); % Число частот спектра
    k=(N/2); % Расчёт масштаба амплитуд
    S=abs(ff(1:n))/k; % Корректировка спектра
end
.....
%% Построение графиков
a=figure(5) % Токи каждой фазы
a.Color='white'
subplot(4, 1, 1);
    plot(T(1:1000), IA(1:1000),'lineWidth', 2) % Построение
сигнала
    hold on;
    plot(T(1:1000), I(1:1000),'lineWidth', 2)
    hold off;
    legend('Фактический ток ', 'Отфильтрованный ток')
    title ('Ток фазы A')

```

```

xlabel('Время, с')
ylabel('Амплитуда, А')
grid on;
subplot(4, 1, 2);
plot(T(1:1000), IB(1:1000), 'lineWidth', 2) % Построение
сигнала
hold on;
plot(T(1:1000), ibf(1:1000), 'lineWidth', 2)
hold off;
legend('Фактический ток ', 'Отфильтрованный ток')
title ('Ток фазы В')
xlabel('Время, с')
ylabel('Амплитуда, А')
grid on;
subplot(4, 1, 3);
plot(T(1:1000), IC(1:1000), 'lineWidth', 2) % Построение
сигнала
hold on;
plot(T(1:1000), icf(1:1000), 'lineWidth', 2)
hold off;
legend('Фактический ток ', 'Отфильтрованный ток')
title ('Ток фазы С')
xlabel('Время, с')
ylabel('Амплитуда, А')
grid on;
subplot(4, 1, 4);
plot(T(1:1000), Is(1:1000), 'red', 'lineWidth', 2) %
Построение сигнала
hold on;
plot(T(1:1000), isf(1:1000), 'blue', 'lineWidth', 2)
hold off;
legend('Фактический ток ', 'Отфильтрованный ток')
title ('Обобщенный ток')
xlabel('Время, с')
ylabel('Амплитуда, А')
grid on;
set(findall(gcf, 'type', 'text'), 'fontSize', 14)
set(findall(gcf, 'type', 'axes'), 'fontSize', 14)
.....
%% Построение годографов
d=figure(1)
d.Color='white'
plot(Is1, 'red', 'lineWidth', 1.5); % Вектор парка тока
hold on
plot(Us, 'blue', 'lineWidth', 1.5); % Вектор парка напряжения
hold on
Id=sin(2*pi*50*T);
Iq=sin(2*pi*50*T-pi/2);
Ip=Id+Iq*i; % Идеальный вектор парка тока
plot(Ip, 'black', 'lineWidth', 1.5);
hold off;
grid on;
ax = gca;

```

```

set(ax, 'ticklabelinterpreter', 'none')
yticklabels(ax, strrep(yticklabels(ax), '-', '-'));
xticklabels(ax, strrep(xticklabels(ax), '-', '-'));
legend('Is-real', 'Us-real', 'Us,Is-ideal')
title('Current Park|s Vector Approach');
xlabel('d ,o.e. ');
ylabel('q ,o.e. ');
set(findall(gcf, 'type', 'text'), 'fontSize', 16)
set(findall(gcf, 'type', 'axes'), 'fontSize', 16)
.....
%% Анализ частотных составляющих спектра
    [pks,locs]=
findpeaks(c_prom(:), 'MinPeakHeigh', 0.56, 'MenPeakDistance', 0.3*10
^4) %Поиска максимумов
span = 10; %Проверка абсолютного максимума
for ij = 1:length(pks)
    if pks(ij) == max(data(locs(ij)-span:locs(ii)+span))
        counter = counter + 1;
        new_pks[counter] = pks[ij];
        new_locs[counter] = locs[ij];
    end
end
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Патенты и свидетельства

1. Патент на изобретение №2626231

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2626231

**СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА С
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Бабанова Ирина
Сергеевна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2016144271

Приоритет изобретения 10 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 10 ноября 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 626 231**⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016144271, 10.11.2016
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.11.2016
Дата регистрации:
24.07.2017
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.11.2016
(45) Опубликовано: 24.07.2017 Бюл. № 21
Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВО СПбГУ, отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий (отдел
ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Бабанова Ирина Сергеевна (RU),
Королёв Николай Александрович (RU)
(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 146950 U1, 20.10.2014.
"ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В
ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ, ПО
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ",
2011. US 6128583 A1, 03.10.2000; US 6297742
B1, 02.10.2001.

(54) СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области диагностики технического состояния электромеханического оборудования, позволяющей производить диагностику и оценку остаточного ресурса асинхронного двигателя (АД), работающего в различных условиях эксплуатации, путем записи электрических и вибрационных параметров, с помощью датчиков вибрации, тока и напряжения, и использование искусственной нейронной сети (ИНС) для комплексного анализа электрических, вибрационных и косвенных параметров с дальнейшей оценкой технического состояния и прогнозирования вероятности безотказной работы электродвигателя (ЭД). Способ позволяет производить диагностику и оценку остаточного ресурса электропривода на базе асинхронного двигателя, работающего в различных условиях

эксплуатации, путем записи электрических и вибрационных параметров, с помощью датчиков вибрации, тока и напряжения и их комплексного анализа с использованием искусственной нейронной сети, позволяющей осуществлять прогнозирование и оценку остаточного ресурса. Технический результат заключается в повышении точности и качества оценки состояния и остаточного ресурса электромеханического оборудования с учетом качества питающей сети и условий эксплуатации, по полученным значениям остаточного ресурса с учетом выявленных состояний на основе работы ИНС, включающей анализ электрических, вибрационных и косвенных параметров и обнаруженных дефектов. 5 ил.

RU 2 6 2 6 2 3 1 C 1

RU 2 6 2 6 2 3 1 C 1

2. Патент на изобретение №2648413

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2648413

**СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОСЕТЕВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО
АГРЕГАТА**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леопидович (RU), Бабанова Ирина Сергеевна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2017101942

Приоритет изобретения 20 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 27 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 20 января 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 648 413**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
G05B 13/02 (2006.01)
G06N 3/02 (2006.01)
G05B 19/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G05B 13/02 (2006.01); G06N 3/02 (2006.01); G05B 19/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017101942, 20.01.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.01.2017Дата регистрации:
27.03.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 20.01.2017

(45) Опубликовано: 27.03.2018 Бюл. № 9

Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет", отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий (отдел
ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Бабанова Ирина Сергеевна (RU),
Королёв Николай Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2445598 C1, 20.03.2012. RU
2242540 C1, 20.12.2004. RU 2313815 C2,
27.12.2007. US 6353815 B1, 05.03.2002.

**(54) СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

(57) Реферат:
Изобретение относится к диагностике
состояния электроприводных устройств. Способ
управления режимами на основе нейросетевого
диагностирования неисправностей и технического
состояния электроприводного
газоперекачивающего агрегата включает
измерение параметров, сбор информации и
проверку ее достоверности, фильтрацию
измерений, проверку измерений, корректировку
показаний измерений, сверку с ограничениями,
вычисление признаков оперативного
диагностирования, распознавание неисправностей
и расчет отклонений. Вычисление признаков

оперативного диагностирования и распознавание
неисправностей осуществляют с учетом
алгоритмов, основанных на работе двух
нейронных сетей типа Кохонена, на основе
которых рассчитывают и оценивают
коэффициенты неисправностей по подсистемам:
смазки, нагнетателя, обмотки статора и
механических дефектов электродвигателя. Затем
оценивают техническое состояние на основании
полученных значений коэффициентов и выбирают
режим диагностирования и управления.
Повышается точность диагностики. 2 ил., 7 ил.

RU 2 648 413 C 1

RU 2 648 413 C 1

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2017614351

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2017614351

**ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ
СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Котелева Наталья
Ивановна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № **2017611561**
Дата поступления **27 февраля 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **12 апреля 2017 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Илиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**RU 2017614351****ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2017614351	Авторы: Жуковский Юрий Леонидович (RU), Котелева Наталья Ивановна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)
Дата регистрации: 12.04.2017	
Номер и дата поступления заявки: 2017611561 27.02.2017	Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)
Дата публикации: 12.04.2017	
Контактные реквизиты: нет	

Название программы для ЭВМ:
**ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

Реферат:

Программа относится к области диагностики технического состояния электрических машин переменного тока минерально-сырьевого комплекса и предназначена для формирования сигналов тока и напряжения статора, вибраций корпуса электрической машины переменного тока для последующей обработки. Разработанная программа основана на генерировании сигналов тока и напряжения в фазах электрической машины переменного тока, а также сигналов вибрации корпуса по трем направлениям (горизонтальное, вертикальное, осевое) в реальном времени или по заданному алгоритму для последующего определения технического состояния и остаточного ресурса электрической машины переменного тока и связанного с ней приводного оборудования. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: генерирование сигналов фазных напряжений и токов статора, содержащих гармонические и интергармонические колебания, характерные для определенного вида и уровня дефекта составных частей машины переменного тока, и связанного с ней приводного оборудования, а также соответствующие определенному виду и уровню показателей качества электрической энергии; генерирование сигналов вибраций корпуса машины переменного тока по трем направлениям (горизонтальное, вертикальное, осевое), содержащих гармонические и интергармонические колебания, характерные для определенного вида и уровня дефекта составных частей машины переменного тока, и связанного с ней приводного оборудования; создание эталонных начальных и предельных образцов сигналов тока статора машины переменного тока на основе расчетных и паспортных данных в зависимости от нагрузки, а также на основе предельно допустимых параметров, приведенных в нормативно-технической документации; расчет характерных частот, соответствующих определенным неисправностям машины переменного тока, и связанного с ней приводного оборудования.

Тип реализующей ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК

Язык программирования: G, Lab VIEW

4. Патент на полезную модель №181087

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 181087

**УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ
ЧАСТОТЫ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2017136959

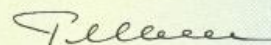
Приоритет полезной модели 19 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 04 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 19 октября 2027 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Изrael

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **181 087** ⁽¹³⁾ **U1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01R 31/34 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 07.09.2018)
Пошлина: учтена за 2 год с 20.10.2018 по 19.10.2019

<p>(21)(22) Заявка: 2017136959, 19.10.2017</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 19.10.2017</p> <p>Дата регистрации: 04.07.2018</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 19.10.2017</p> <p>(45) Опубликовано: 04.07.2018 Бюл. № 19</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2155328 C1, 27.08.2000. RU 125718 U1, 10.03.2013. RU 2348050 C1, 27.02.2009. CN 201575925 U, 08.09.2010.</p> <p>Адрес для переписки: 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2, ФГБОУ высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет", отдел интеллектуальной собственности и трансфера технологий (отдел ИС и ТТ)</p>	<p>(72) Автор(ы): Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Королев Николай Александрович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)</p>
--	---

(54) УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**(57) Реферат:**

Полезная модель относится к области диагностики электрооборудования. Устройство содержит шину сигналов, микроконтроллерный блок, блок питания, шину питания, блоки измерений, подключенные к электрической линии с коммутационными аппаратами, питающей двигателя переменного тока, при этом блок измерений состоит из датчиков тока и напряжения. Технический результат заключается в повышении точности и достоверности оценки технического состояния

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2020615940

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020615940

ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

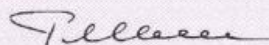
Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан
Юрьевич (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2020614463

Дата поступления 18 мая 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 04 июня 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2020615940**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2020615940 Дата регистрации: 04.06.2020 Номер и дата поступления заявки: 2020614463 18.05.2020 Дата публикации и номер бюллетеня: 04.06.2020 Бюл. № 6 Контактные реквизиты: нет	Автор(ы): Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Королёв Николай Александрович (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)
--	---

Название программы для ЭВМ:
**ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ
 УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

Реферат:

Программа может быть использована в проектировании автоматизированного электропривода с асинхронным двигателем и преобразователем частоты, а также в учебном процессе для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя; выбор скалярного или векторного принципа управления; выбор структуры силового преобразователя частоты; выбор типа силовых управляемых ключей; определение оптимальных настроечных коэффициентов регуляторов при выбранных конфигурациях преобразователя частоты и асинхронного двигателя.

Язык программирования: C, Java

Объем программы для ЭВМ: 8 Мб

6. Патент на изобретение № 2727386

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2727386

**УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Королёв Николай Александрович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Жуковский Юрий Леонидович (RU), Желтиков Николай Олегович (RU)*

Заявка № 2019134080

Приоритет изобретения 23 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 23 октября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 727 386** (13) **C1**
(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 31/34 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019134080, 23.10.2019
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.10.2019
Дата регистрации:
21.07.2020
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 23.10.2019
(45) Опубликовано: 21.07.2020 Бюл. № 21
Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет", Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
Королёв Николай Александрович (RU),
Васильев Богдан Юрьевич (RU),
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Желтиков Николай Олегович (RU)
(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2578044 C1, 20.03.2016. RU 193341
U1, 24.10.2019. RU 111684 U1, 20.12.2011. RU
2626231 C1, 24.07.2017. US 6297742 B1,
02.10.2001.

(54) УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области диагностики электрооборудования и позволяет производить оценку технического состояния и остаточного ресурса электродвигателя и сопряженного с ним механического оборудования путем регистрации мгновенных значений вибраций, шума, температуры посредством датчиков с последующей диагностикой и прогнозированием технического состояния и оценкой остаточного ресурса электродвигателя, реализованной программно с беспроводной передачей диагностических данных на сервер, при этом с установкой устройства на корпус электродвигателя и обеспечением автономности его питания. Устройство диагностирования и оценки остаточного ресурса электродвигателей включает блок функциональной диагностики, блок расчета остаточного ресурса, датчики температуры и датчики вибрации, выходы которых подключены к блоку функциональной

диагностики. Устройство дополнительно содержит не менее двух датчиков шума, выходы которых соединены со входами блока функциональной диагностики и блока прогнозирования, выходы которых подключены к входу блоку расчета остаточного ресурса, выход которого соединен со входом передатчика, который соединен по беспроводному каналу связи с сервером и через него с мобильным устройством. Техническим результатом является повышение технологической совместимости системы диагностики за счет возможности производить диагностику электромеханических систем и обеспечение сбора информации о фактическом состоянии электродвигателя и сопряженного с ним механического оборудования, хранения и обработки статистической информации на сервере при минимальной элементной базе и отсутствии силовых и коммуникационных проводов. 1 ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Справка о внедрении результатов диссертационной работы



**Акционерное общество
«Приборостроительный завод
«ВИБРАТОР»**

РФ, 194292, г. Санкт-Петербург, 2-й Верхний переулок, д.5 лит.
А тел./факс (812) 517-64-79
Р/с 40702810455080152651 в Северо-Западном банке
ПАО «Сбербанк» г. С-Петербург
К/с 30101810500000000653 БИК 044030653
ИНН 7813028750 КПП 780201001 ОКПО 05755097
www.vbrspbru.

ФБГОУ ВО «Санкт-
Петербургский горный университет»

Кому: Диссертационный совет
ГУ 212.224.14

Тема: О внедрении в
промышленное производство
результатов диссертационной работы
«Оценка технического состояния
электротехнических комплексов с
асинхронным электроприводом по
частотным составляющим спектра
тока»

«21 » января 2020 г.

Э-20/006

На № _____

от _____ г.

СПРАВКА

Настоящая справка подтверждает факт использования результатов диссертационной работы «Оценка технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом по частотным составляющим спектра тока», выполненной Королёвым Николаем Александровичем в ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» на промышленном производстве.

Результаты диссертационной работы, состоящие в определении пороговых значений гармонических составляющих тока, вызванных дефектами, и способе определения диагностических параметров электропривода, были применены на АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР» (г. Санкт-Петербург) в оценке качества (точности, быстродействия) работы прототипа устройства «Система диагностики роторного оборудования» и возможности разработки модификации данного устройства для применения с целью диагностики частотно-регулируемого электропривода.

Внедрение результатов диссертационной работы состоит в доработке существующего диагностического оборудования, позволяющего оперативно идентифицировать состояние электротехнического комплекса с электроприводом, а счет применения разработанного способа: «Способ диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем» и методики определения пороговых значений технического состояний электропривода.

Разработанные средства диагностики позволят обеспечить:

Исп. Трушина А.А.
Т./ф.: (812) 517-06-64, доп.112
e-mail: peo@vibrator.spb.ru



- минимизацию времени работы при снижении энергетических и механических показателей, вызванного дефектами электропривода, путем алгоритмов упреждающего управления, резервирования или отключения;

- оптимизировать сроки технического обслуживания и ремонта электромеханических устройств и переход от плановой системы к системе обслуживания по требованию.

Генеральный директор

М.П.



А.В. Кильдияров/
(подпись)

