

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

На правах рукописи

Булдыско Александра Дмитриевна



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ РАННЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ
ПУТЕМ АНАЛИЗА СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРА ТОКА

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексные и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Жуковский Ю.Л.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	13
1.1 Анализ состояния нефтегазовой промышленности России	13
1.1.1. Общая характеристика отечественной НГП	13
1.1.2. Перспективы и риски НГП России	14
1.1.3. Износ оборудования НГП	17
1.2 Значение асинхронного двигателя в НГП.....	19
1.3 Статистическая оценка и анализ повреждаемости АД в НГП.....	26
1.3.1. Статистика выхода из строя АД и их узлов	26
1.3.2. Анализ причин выхода из строя АД.....	31
1.4 Анализ показателей энергетической эффективности асинхронного электропривода в системах транспортировки нефти	32
1.4.1. Влияние на энергоэффективность и надежность функционирования объектов транспортировки и добычи нефти	32
1.4.2. Влияние наличия дефектов ЭМО на эффективность технологического процесса.....	35
1.4.3. Определение показателей энергетической эффективности асинхронного электропривода в системах транспортировки нефти.....	36
1.5 Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ДИАГНОСТИКИ АД И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО СИГНАЛАМ ТОКА СТАТОРА	42
2.1 Моделирование и анализ влияния наличия дефекта на энергетические характеристики АД	42
2.1.1. Виды неисправностей обмотки статора.....	42
2.1.2. Моделирование снижения сопротивления изоляции обмотки статора на корпус	44
2.2 Обзор существующих методов диагностики асинхронного электропривода	49

2.3	Методы диагностики асинхронного двигателя по сигналам тока.....	55
2.4	Сравнительный анализ методов разложения сигналов тока.....	57
2.5	Способ раннего обнаружения наличия дефекта АД на основе сингулярного разложения.....	61
2.5.1.	Математическое описание сингулярного спектрального анализа	61
2.5.2.	Оценка вкладов и группировка	65
2.5.3.	Обоснование выбора длины окна.....	67
2.5.4.	Обоснование количества рассматриваемых компонент	68
2.5.5.	Визуализация работы SSA	68
2.6	Выводы по главе 2.....	73
ГЛАВА 3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ АД НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТОКА СТАТОРА		74
3.1	Описание лабораторного стенда и экспериментальных исследований алгоритма раннего обнаружения дефектов АД.....	74
3.1.1.	Лабораторный стенд	74
3.1.2.	Диагностируемые дефекты АД.....	77
3.1.3.	Лабораторные исследования по обнаружению дефекта подшипника.....	77
3.1.4.	Лабораторные исследования по диагностике несоосности.....	80
3.1.5.	Лабораторные исследования при ослаблении крепления	81
3.1.6.	Обработка результатов.....	82
3.2	Исследование дефектов подшипника методом сингулярного разложения тока фаз статора АД.....	84
3.2.1.	Исследование образования раковин в подшипниках методом сингулярного спектрального анализа по фазам тока АД.....	84
3.2.2.	Исследование дефекта образования раковин в подшипниках методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД.....	94
3.3	Исследование несоосности.....	98
3.3.1.	Исследование несоосности методом сингулярного спектрального анализа токов фаз статора АД.....	98
3.3.2.	Исследование несоосности методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД.....	102

3.4	Исследование механического ослабления креплений	105
3.4.1.	Исследование механического ослабления креплений методом сингулярного спектрального анализа токов фаз статора АД.....	105
3.4.2.	Исследование механического ослабления креплений методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД.....	110
3.5	Оценка чувствительности метода сингулярного разложения относительно спектрального анализа тока на основе быстрого преобразования Фурье	113
3.6	Выводы по главе 3.....	119
ГЛАВА 4	АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ АД.....	121
4.1	Системы управления ТОиР в условиях цифровизации	121
4.1.1.	Особенности ТОиР насосных систем	121
4.1.2.	Системы управления ТОиР в условиях НГП.....	121
4.1.3.	Тенденции в управлении ТОиР АД.....	122
4.2	Алгоритм воздействия на ТОиР АД.....	125
4.3	Определение потерь электроэнергии при изменении уровня дефекта	126
4.4	Модель оценки стоимости жизненного цикла АД с учетом выявленных потерь	131
4.5	Выводы по главе 4.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	156
ПРИЛОЖЕНИЕ А	Оценка вкладов компонент.....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	Результаты группировки компонент	180
ПРИЛОЖЕНИЕ В	Экономический расчет	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	Акт внедрения результатов диссертации	200
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ	201

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Согласно исследованиям международного энергетического агентства, электродвигатели потребляют более 40% производимого в мире электричества [166, 174] и производят до 5 Гт выбросов CO₂ [175]. И даже небольшое повышение эффективности электродвигателей может значительно снизить потребление энергии и выбросы углекислого газа. Рентабельный потенциал повышения энергоэффективности электромеханических систем с нерегулируемым электроприводом составляет примерно 20-30%, что снизит общий спрос на электроэнергию на 10% [106].

В нефтегазовой промышленности системы с электрическим приводом составляют более 60% общего потребления электроэнергии. Как при регулируемом, так и при нерегулируемом электроприводе главным образом используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Любой сбой в работе системы электропривода приводит к значительным экономическим потерям; при этом наличие развивающихся дефектов в асинхронном двигателе приводит к снижению его энергетической эффективности и дополнительным потерям энергии, а также к ускоренному износу всей электромеханической системы, включая сопряженное оборудование. Дополнительную материальную нагрузку на предприятие оказывают традиционные методы технологического обслуживания и ремонта (ТОиР), связанные с остановкой процесса, и более того – аварийные ситуации, связанные с ускоренным износом оборудования, что обуславливает переход к диагностике оборудования по фактическому состоянию.

Учитывая продолжительный режим работы электрических машин в нефтегазовой промышленности и длину жизненного цикла эксплуатации, составляющую более 12-20 лет, наличие развивающихся дефектов приводит к снижению эффективности технологических процессов и ключевых показателей эффективности всей компании. Поэтому необходимо повышать эффективность

эксплуатации асинхронного электропривода путем развития современных инструментов диагностики и управления техническим обслуживанием и ремонтом электромеханического оборудования.

В настоящее время при изучении поведения сложных систем широко используется подход, основанный на анализе сигналов, производимых системой. Это актуально, когда математическое описание изучаемого процесса невозможно, но в наборе имеется некоторая отличительная наблюдаемая величина. Применительно к задаче выявления дефекта, необходимо выделить из сигнала компоненты, ответственные за некоторое искажение исходного сигнала исправного двигателя. Обычно такие «подсигналы» незначительны, особенно на ранних стадиях развития дефекта, что создает дополнительные трудности при их дифференциации.

В нефтегазовой отрасли к доле оборудования (например, к погружным насосам) доступ ограничен, а в ряде случаев, таких как эксплуатация буровых установок, присутствуют дополнительные паразитные вибрации, искажающие анализ сигналов. Поэтому исследование построено на методах на основе анализа электрических сигналов АД, которые более доступны и контролируемы в рабочем режиме.

Степень разработанности темы исследования

Общий вклад в исследование надежности и вопросы диагностирования электрических машин внесли многие отечественные и зарубежные ученые, в том числе: Гольдберг О.Д., Ключев В.В., Воропай Н.И., Розанов М.Н., Савельев В.А., Bonnett A.H., Habetler T.G., Thomson W.T. и др. Существенный вклад в разработку методов и систем диагностирования асинхронных двигателей внес Козярук А.Е. Разработка и оценка методик диагностирования АД по потребляемому току статора рассмотрена в трудах Баркова А.В., Баширова М.Г., Вейнреба К.Б., Новожилова А.Н., Рогачева В.А., Merizalde Y., Garcia-Perez A. Fenger M.

Широкий спектр подходов к оценке технического состояния электрооборудования и электромеханического оборудования рассмотрен в работах

Назарычева А.Н., Абрамовича Б.Н., Носова В.В., Ключева Р.В., Иванова С.Л., Шишлянникова Д.И., Varabady J.

Современные интеллектуальные подходы и инструменты применительно к системам диагностики и технического обслуживания и ремонта изложены в работах Хальясмаа А.И., Котелевой Н.И., Филиппова Е.В., AlShorman O., Kumar R.R., Khandelwal M., Ayani M., Vathooran M.

Развитию метода сингулярного разложения временного ряда посвящено множество трудов Голяндиной Н.Е., практическая сторона применения данного метода рассмотрена в работах Ревина И.Е., Кузьмина О.В., Zhao X., Liang L.

Объект исследования – электротехнические комплексы промышленных предприятий, имеющие в своем составе электропривод, построенный на основе асинхронного двигателя.

Предмет исследования – методы анализа электрических параметров для ранней идентификации дефектов асинхронного двигателя.

Цель работы – повышение эффективности эксплуатации асинхронного электропривода путем применения алгоритма обнаружения дефекта на ранней стадии развития на основе токов статора.

Идея работы – раннее обнаружение дефектов асинхронного двигателя реализуемо на основе математического анализа временного ряда сигнала тока и позволяет снизить потери электроэнергии и стоимость эксплуатации электродвигателя.

Задачи исследования:

1. Выявить научно-технические проблемы эффективности функционирования объектов добычи и транспорта нефти и связанных электротехнических комплексов.

2. Проанализировать влияние наличия дефектов асинхронного двигателя на показатели эффективности электротехнических комплексов объектов добычи и транспорта нефти.

3. Проанализировать эффективность методов диагностики АД, основанных на анализе параметров вибрации и электрических параметров в составе электротехнических комплексов.

4. Разработать метод ранней идентификации дефектов АДКЗР и отслеживания их развития на основе математических методов анализа временных рядов сигналов тока.

5. Провести экспериментальные исследования асинхронного двигателя с физической имитацией дефектов и анализ эффективности применения методики идентификации дефектов на ранней стадии развития.

6. Проанализировать эффективность управления техническим обслуживанием и ремонтом асинхронных двигателей в составе электротехнических комплексов транспорта нефти и разработать алгоритм воздействия на ТОиР АД на основе выявления дефекта и отслеживания его развития.

7. Разработать модель оценки стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла электродвигателя с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта.

8. Разработать систему принятия решения по эффективному регулированию техническим обслуживанием и ремонтом асинхронных двигателей на основе потерь электроэнергии и стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла.

Научная новизна работы:

1. Предложен алгоритм на основе сингулярного спектрального анализа тока асинхронного двигателя, отличающийся тем, что позволяет выделять группы и категории компонент временного ряда тока статора АД, идентифицирующие наличие дефекта на ранней стадии развития и позволяющие отслеживать изменения уровня развития дефектов.

2. Экспериментально установлены зависимости изменения уровня вклада компонент, групп компонент и категорий компонент от уровня развития дефектов асинхронного двигателя: образования раковин в подшипнике, ослабления креплений и несоосности валов.

3. Предложен алгоритм воздействия на план ТОиР на основе раннего обнаружения уровня дефекта асинхронного двигателя и оценки стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла, с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана алгоритм выявления дефекта на ранней стадии развития и отслеживания его развития по токам фаз статора и обобщенному току двигателя и методика выявления признаков, характеризующих возникновение и развитие дефекта на основе метода сингулярного разложения исходной выборки применительно к сигналу тока статора АДКЗР.

2. Разработана модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации асинхронного электродвигателя с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов.

3. Предложен алгоритм воздействия на план технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей в составе электротехнического комплекса транспорта нефти на основе модели оценки стоимости процесса эксплуатации асинхронного электродвигателя с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов.

Результаты внедрены в производственную деятельность ООО «НПП «Комплексные интеллектуальные технологии» при разработке микропроцессорных устройств релейной защиты в электротехнических комплексах, имеющих в своем составе электропривод, построенный на основе асинхронного электродвигателя, в виде «Алгоритма выявления дефекта подшипника асинхронного двигателя на основе анализа сингулярного спектра тока статора» (акт внедрения от 31.05.2023, приложение Г). Работа выполнялась в рамках НИР «Применение цифровых двойников для управления энергоэффективностью и надежностью объектов» ПАО «НК «Роснефть» по договору № 100021/03521Д от 19.07.2021 и НИ-29-808-21 «Цифровая платформа предиктивной аналитики и управления жизненным циклом электромеханического оборудования «GenesisDrive» в рамках субсидии на выполнение

государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год № FSRW-2020-0014.

Методология и методы исследования

Результаты диссертационной работы получены с помощью методов анализа и обобщения данных, статистических методов обработки данных, методов численного анализа; теории обобщенной электрической машины; теории электропривода; теории временных рядов; методов машинного обучения и программирования на языке Python. Имитация дефектов выполнена на лабораторном стенде «Мониторинг и диагностика электромеханического оборудования» Образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Изменение компонент сингулярного спектра мгновенных значений сигналов токов статора асинхронного двигателя позволяет обнаружить и отследить развитие дефекта на ранней стадии развития при вариации нагрузки и определить дополнительные потери электроэнергии, обусловленные наличием дефекта.
2. Применение алгоритма управления планом ТОиР на основе раннего обнаружения дефектов по электрическим параметрам и оценки стоимости процесса эксплуатации с учетом потерь, обусловленных наличием дефектов, позволяет повысить эффективность эксплуатации асинхронного электропривода в составе электротехнических комплексов объектов добычи и транспорта нефти.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена численным и имитационным моделированием, экспериментальными исследованиями на базе Образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы представлены на следующих семинарах и конференциях: Международный семинар «The 12th German-Russian raw materials conference. Young researchers day» 27 ноября 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет; III Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица»

17-21 февраля 2020 г., г. Нижневартовск; III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» 5-6 марта 2020 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет; X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», 14-16 октября 2020 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет; III Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» SEWAN-2021, 19-24 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 22-26 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет.

Личный вклад автора. В рамках исследования автором были сформулированы цели и задачи исследования, выполнен обзор отечественной и зарубежной научной литературы, проведен анализ существующих методов идентификации дефектов. Сформулированы и доказаны научные положения. Разработана методика ранней идентификации и отслеживания развития дефектов асинхронного двигателя на основе математических методов анализа временных рядов сигналов тока. Предложена модель оценки стоимости процесса эксплуатации АД с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта. Основные результаты диссертационной работы изложены в подготовленных научных публикациях и представлены на конференциях.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах (пункты списка литературы № 20, 21, 22, 23, 131, 154, 156, 157, 158, 159), в том числе в 6 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (пункты списка литературы № 39, 40, приложение Д).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой их них, заключения, списка литературы, включающего 177 наименований. Работа изложена на 202 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка, 48 таблиц, 5 приложений.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, директору образовательного центра цифровых технологий Жуковскому Юрию Леонидовичу за неоценимую помощь и вклад в подготовку и проведение научных исследований по диссертации.

ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1 Анализ состояния нефтегазовой промышленности России

1.1.1. Общая характеристика отечественной НПП

Нефтегазовая промышленность является одной из ведущих отраслей российской экономики, ежегодно почти 30 % федерального бюджета составляют нефтегазовые доходы. Несмотря на распространенную тенденцию к диверсификации топливных ресурсов за счет увеличения доли возобновляемых источников энергии в составе топливно-энергетического баланса [103], рост промышленности и численности населения, развитие транспортной инфраструктуры продолжают формировать увеличивающийся спрос на нефть. И сегодня устойчивая динамика роста потребления в странах Азии создает условия для переориентации мирового рынка нефтепродуктов [168].

Россия занимает шестое место в мире по разведанным запасам нефти, составляющим около 8,5 % от общемировых запасов. Согласно Стратегии развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р, нефть относится ко второй группе полезных ископаемых, для которых достигнутые уровни добычи недостаточно обеспечены запасами разрабатываемых месторождений на период до 2035 г. Кроме того, среди всех запасов до 65 % занимают трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ). Постепенное истощение ресурсного потенциала приводит к необходимости совершенствования существующих технологий поиска и разработки месторождений [159]. В ряду существующих мер стоят программы импортозамещения, и данный вектор активно поддерживается государством [46].

Доля импортного оборудования для нефтегазовой отрасли в 2020 году составила около 43 %, что на 17 % ниже значений 2014 года. Стоит отметить, что доля зарубежного базового оборудования для нефтедобычи составляет всего 10-

15 %, а для различных интеллектуальных систем и высокотехнологичного оборудования импорт достигает 80 % [131].

Зависимость от импортного оборудования является сдерживающим фактором развития компаний: низкое качество нефти затруднительно для переработки, снижает производительность и срок службы оборудования, увеличивает количество выбросов CO₂. Высоковязкие нефти могут образовывать асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО), которые вызывают коррозию и снижают пропускную способность трубопроводов [64]. Кроме того, для транспортировки тяжелой нефти необходимо предварительное смешивание с более легкими сортами или воздействие тепловое, ультразвуковое, с помощью химических реагентов. Выполнение этих операций в свою очередь требует затрат энергоресурсов. В рамках реализации экологической политики компании активно следят за энергопотреблением и стараются найти способы его снизить [137, 158]. Основным методом снижения энергозатрат является замена оборудования.

1.1.2. Перспективы и риски НГП России

Помимо факторов истощения ресурсного потенциала и зависимости от импортного оборудования, для отечественной НГП существуют также дополнительные прямые и косвенные риски, угрожающие развитию отрасли. В исследованиях [157, 159] выявлены риски различных типов и их эволюция в негативном, позитивном и консервативном сценариях, оказывающих давление на развитие углеводородной энергетики в целом и нефтегазовой отрасли в частности.

В таблице 1.1 приведено обобщение некоторых факторов (рисков), оказывающих влияние на перспективы развития НГП. Необходимо отметить, что данные риски влияют в первую очередь на энергетическую эффективность и безаварийную работу технологического и энергетического оборудования, составляющим основу отрасли и обеспечивающим ее работоспособность.

Таблица 1.1 – Прогнозируемые состояния углеводородной энергетики Российской Федерации с учетом влияния рисков, оценка 2020 г. [157, 159] на основании [79, 99, 136, 138, 158, 169, 176, 103]

Типы рисков	Негативный сценарий	Консервативный сценарий	Позитивный сценарий
<p>Политический тип риска «Санкции»</p>	<p>1. Снижение добычи сырой нефти до 4% (с 83 млн барр./сут. до 80 млн барр./сут.); 2. Отсутствие доступа к зарубежным технологиям для реализации новых проектов и технологических возможностей по интенсификации добычи на действующих месторождениях.</p>	<p>1. Перерывы в поставках энергоресурсов; 2. Поддержание существующих объемов производства за счет уже подготовленных месторождений; 3. Возможное снижение добычи сырой нефти до 2% до 81,34 млн барр./сут.</p>	<p>1. Поиск новых партнеров (прогнозируемый рост добычи сырой нефти до 2%) (с 83 млн барр./сут. до 84,66 млн барр./сут.); 2. Адаптация к новым условиям и развитие собственных технологий.</p>
<p>Социокультурный тип риска «Недостаточная популяризация энергосберегающих о производства и потребления»</p>	<p>1. Рост энергетических потерь до 30% в связи с отсутствием современной системы организационно-правового механизма управления; 2. Снижение производительности труда и рост травматичности на производственных объектах; 3. Рост спроса на энергоресурсы (нерациональное потребление).</p>	<p>1. Разработка систем стимулирования персонала к снижению потерь электроэнергии и эффективному потреблению на основе на основе информационно-коммуникационной инфраструктуры.</p>	<p>1. Уменьшение зависимости от импортного оборудования и технологий; 2. Снижение спроса на энергоресурсы вследствие внедрения энергоэффективного мышления в общество.</p>
<p>Экономический тип риска «Ценовая неустойчивость на энергоресурсы»</p>	<p>1. Снижение мирового спроса на нефть на 10-11 млн барр./сут. при росте предложения на 5-6 млн барр./сут.; 2. Затраты на SAPEX и OPEX (долл./барр.) превышают в 6-7 раз цены на нефть для крупнейших производителей.</p>	<p>1. Предложение превышает спрос не более, чем на 25%; 2. Затраты на SAPEX и OPEX (долл./барр.) превышают в 2-3 раза цены на нефть для крупнейших производителей.</p>	<p>1. Снижение мирового спроса на нефть на 10-11 млн барр./сут. с взаимным снижением предложения на 5-6 барр./сутки, предложение превышает спрос не более, чем на 10%; 2. Затраты на SAPEX и OPEX (долл./барр.) соизмеримы с ценами на нефть для крупнейших производителей.</p>

Продолжение Таблицы 1.1

<p>Экономический тип риска «Потребление энергии»</p>	<p>1. Потребление первичной энергии увеличится на 30% к 2040 г.; 2. Рост спроса на нефть составит 17% и достигнет 4,9-5 млрд т н.э. к 2040 г.; 3. Спрос на электроэнергию увеличится на 60% к 2040 г.</p>	<p>1. Потребление первичной энергии увеличится не более, чем на 25% к 2040 г.; 2. Рост электропотребления к 2035 году в 1,18 - 1,25 раза до 1380 млрд. кВт·ч.</p>	<p>1. Потребление первичной энергии увеличится не более, чем на 10% к 2040 г.; 2. Снижение спроса на нефть до 20% и достигнет 3,2 млрд т н.э. к 2040 г.</p>
<p>Правовой тип риска «Экологическое регулирование»</p>	<p>1. Ужесточение политики декарбонизации, принудительное снижение выбросов парниковых газов.</p>	<p>1. В период 2020–2025 годов будут реализованы меры государственного регулирования выбросов парниковых газов, в том числе сформирована система учета выбросов парниковых газов на уровне хозяйствующих субъектов, а также созданы условия для стимулирования реализации проектов, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и их абсорбцию.</p>	<p>1. Мониторинг и отчетность крупных промышленных и энергетических предприятий с ежегодным выбросом парниковых газов 150 тыс. тонн в пересчете на углекислый газ (CO₂-эквивалент) и более; 2. Реализация стратегии РФ по снижению до 2050 года, меры поддержки на 2020 г. оцениваются в 4,3 трлн руб. ежегодно.</p>
<p>Технологический тип риска «Отсутствие развитой энергетической инфраструктуры»</p>	<p>1. Износ энергетической инфраструктуры приближается к 75% к 2040 году; 2. До 19 тыс. аварий ежегодно по причине использования устаревшего низкоэффективного оборудования.</p>	<p>1. Износ энергетической инфраструктуры – 48%; 2. Тарифная нагрузка продолжит увеличиваться, с учетом инфляции, на 12% ежегодно</p>	<p>1. Износ энергетической инфраструктуры – 35%; 2. Снижение количества аварий при использовании изношенного оборудования в 2-3 раза.</p>

Анализ возникновения данных рисков, проведенный в исследовании [157], показал следующее: риски спровоцированы преимущественно сосредоточенностью и ограниченностью технологического развития в НГП традиционными базовыми технологиями. Для нивелирования данных рисков, как и для снижения энергозатрат предприятий (раздел 1.1.1) необходима модернизация НГП с целью достижения технологической эффективности процессов. Возникает необходимость и спрос на технологии, позволяющие повышать эффективность работы оборудования, продлять его жизненный цикл эксплуатации в топливно-энергетическом и минерально-сырьевом комплексах для достижения устойчивого развития страны [8].

Результаты сценарного анализа (таблица 1.1) демонстрируют высокий спрос в консервативном и позитивном сценариях на эффективное использование оборудования, а в негативном сценарии – только необходимость обеспечения безопасной эксплуатации ключевого оборудования, обеспечивающем работоспособность ЭМК. Без повышения эффективности эксплуатации электромеханического оборудования существуют риски, связанные с ростом потребления как продукции нефтегазовой промышленности, так и увеличения потребления энергии и дефицитом кадровых ресурсов. Данные риски могут представлять серьезную угрозу для экономической эффективности всего нефтегазового сектора.

1.1.3. Износ оборудования НГП

Одним из угрожающих НГП факторов, оказывающим негативное влияние на эффективность технологических процессов, является износ оборудования (таблица 1.1, технологический тип риска). Степень износа оборудования и стареющая инфраструктура в энергетике в целом является одной из самых масштабных проблем [37, 154]. В 2019 году износ оборудования в энергетике практически достиг критического максимума и приблизился к 65 % [170]:

1. *Нефтегазовая отрасль* – 58 % изношенности инфраструктуры: требуются более совершенные методы предотвращения аварий и своевременного проведения

технического воздействия (плановое диагностирование, реконструкция, техническое перевооружение и т.д.) [131].

2. Системы электроснабжения – 60 % изношенности инфраструктуры [35]:

- высоковольтные линии и кабельные линии 0,38-20 кВ – 65 % износа [44];
- высоковольтные и кабельные линии 35-110 кВ – 60 % износа [56].

Ввод новых мощностей недостаточен для обеспечения роста потребности в электроэнергии и надежного стабильного электроснабжения потребителей при данном уровне потребления. С каждым годом состояние основных фондов ухудшается, при этом потребление электроэнергии в Российской Федерации активно растет с 1995 года (рисунок 1.1).

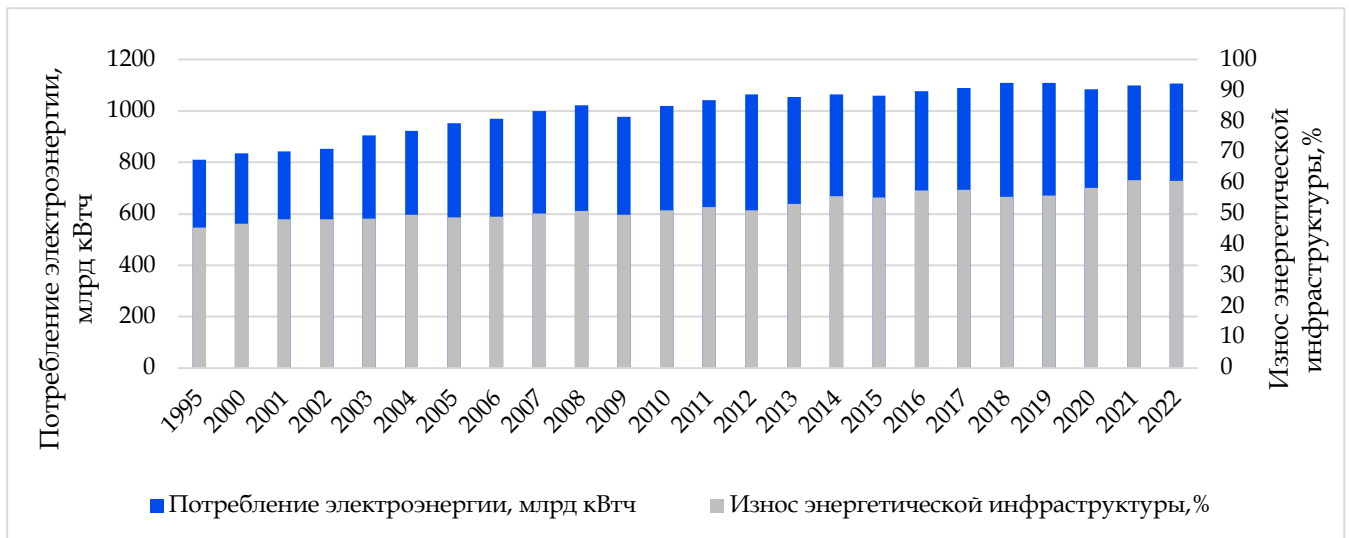


Рисунок 1.1 – Оценка состояния основных фондов Российской Федерации (1990-2022 гг.)

[163, 170]

В таблице 1.2 [131] представлены данные о состоянии мировой энергетической инфраструктуры на 2018 год, прогнозные данные до 2030 года и необходимые инвестиции. Инвестиции, которые выделяются регионами для решения этой проблемы, недостаточны по сравнению с необходимыми, что вызывает появление инвестиционного разрыва, из-за которого износ инфраструктуры с каждым годом нарастает. На 2018 год инвестиции в инфраструктуру составляют 124 трлн рублей, при необходимых вложениях до 149 трлн рублей.

Таблица 1.2 – Требуемые инвестиции в инфраструктуру и ее износ до 2030 года [131]

Регион	Износ энергетической инфраструктуры, %				Требуемые инвестиции, млн руб.			Инвестиционный разрыв, млн руб. (%)
	2018	2025	2030	2030*	2018	2025	2030	2030
ЕС	25	28	30	27	18340	19200	23340	1410 (6%)
США	56,6	59	64	44	22440	25680	28160	8900 (31%)
Азия	48	54	55	30	88000	104500	115500	11000 (9%)
Россия	66,6	75,7	84	49,5	3245	3690	4070	1650 (41%)
Африка	65	70	73	53	9790	12155	13915	3850 (27%)
Все регионы	52,2	57,3	61,2	42	149790	169180	184985	26805 (15%)
<i>*Процент общего износа энергетической инфраструктуры, который должен быть достигнут к 2030 году</i>								

То есть темпы роста физического износа энергетической инфраструктуры выше темпов внедрения противодействующих инструментов. Анализ состояния инфраструктуры в России показал износ основных фондов выше 57 % в секторе горной промышленности, 58 % – в нефтяной и свыше 60 % в энергетической отрасли [63]. Средний показатель доли оборудования со сверхнормативным сроком службы для энергетических предприятий достигает почти 30 % [101, 170]. Такая техника постоянно находится в «предотказном» состоянии, что приводит к увеличению доли затрат на ее содержание в себестоимости продукции производства. В то же время предприятия при ликвидации техники ориентируются на ее физическую изношенность, сдерживая инвестиции в модернизацию и замену оборудования на более новое и энергоэффективное [168].

1.2 Значение асинхронного двигателя в НГП

На долю асинхронных двигателей приходится большая часть потребления электроэнергии практически в любой отрасли (рисунок 1.2). Поскольку асинхронные двигатели экономичны, отвечают высокому уровню надежности и довольно нетребовательны к условиям окружающей среды, они находят широкое применение во множестве отраслей – от медицинской до автомобильной промышленности, как и во всех секторах топливно-энергетического комплекса (ТЭК). В России на асинхронные электродвигатели по разным оценкам приходится до 50% от всей потребляемой электроэнергии [48], в нефтегазовой промышленности системы с электрическим приводом составляют более 60% общего потребления электроэнергии. Даже небольшое повышение энергетической

эффективности электродвигателей может значительно снизить потребление энергии и выбросы CO₂. Потенциал повышения энергоэффективности электромеханических систем с нерегулируемым электроприводом составляет примерно 20-30%, что снизит общий спрос на электроэнергию на 10% [166, 171].

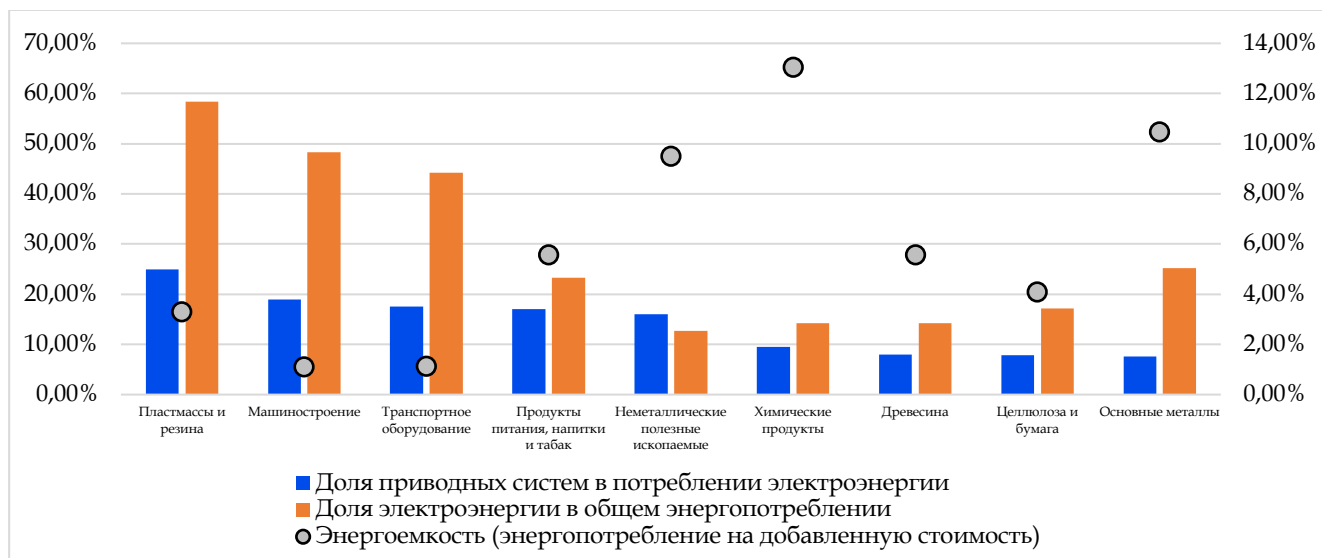


Рисунок 1.2 – Потребление электроэнергии электроприводными системами как доля потребления электроэнергии по секторам промышленности [174]

Электропривод является ключевым звеном любого промышленного предприятия, а двигатели, соответственно, имеют решающее значение для производительности операций и определяют конечную стоимость продукции, которая напрямую зависит от технологической эффективности, определяющей оптимальное (лучшее из всех возможных) сочетание факторов производства, при которых процессы отрасли (рисунок 1.3) происходят с наименьшими затратами ресурсов.

В нефтегазовой индустрии асинхронные двигатели в составе электропривода используются в системах поддержания пластового давления, установках подготовки нефти, вентиляционных системах, на добывающих скважинах и т.д. (рисунок 1.3).

В таблице 1.3 приведен анализ распространенных серий двигателей в нефтегазовой промышленности (НГП). Большинство двигателей в ЭТК НГП относятся к классу низковольтных: начиная с 0,25 кВт и в среднем до 1600 кВт напряжение питания составляет 220-1140 В. Двигатели среднего класса напряжения преимущественно используются до 10 кВ. Двигатели других классов в нефтегазовой промышленности не используются.

Как видно из таблицы 1.3, такое оборудование, как центробежные и поршневые компрессоры, вспомогательные генераторы и насосы, среди прочего, имеют широкое применение и используют двигатели переменного тока. Это стимулирует рост рынка электродвигателей, поскольку крупные компрессоры и насосы составляют основу нефтегазовой отрасли. Как итог, ожидаемый совокупный среднегодовой темп роста (Compound annual growth rate, CAGR) рынка асинхронных двигателей к 2028 году составляет 5%, а среднегодовой темп роста глобальных продаж электродвигателей переменного тока на рынке нефти и газа – 4,7% [167, 172].

Распространению электродвигателей способствуют мировые вызовы [154], такие как урбанизация и растущий спрос на электроэнергию. Усиливающиеся требования к экономичности, энергобезопасности, экологичности, энергоэффективности и адаптивности энергетической инфраструктуры для предприятий [69, 71, 74, 105], рост стоимости электроэнергии и необходимость постоянных инвестиций в обновление стареющей инфраструктуры [131] также способствуют к поиску средств экономии и снижению эксплуатационных расходов.

Таблица 1.3 – Анализ распространенных серий двигателей в нефтегазовой промышленности

Назначение	Серия	Описание	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Режим работы
Для магистральных насосов	СТД	Синхронные турбодвигатели предназначены для привода компрессоров, насосов, газовых нагнетателей и других быстроходных механизмов.	630 – 12500	3000	S1
	СТДП	Синхронные турбодвигатели предназначены для привода насосов, компрессоров, газовых нагнетателей, воздуходувок и других быстроходных механизмов во взрывоопасных помещениях всех классов (кроме взрывоопасных зон наружных установок класса В-П).	1250 – 12500	3000	S1
	СТДМ	Синхронные двухполосные двигатели трехфазного тока частотой 50 Гц. Предназначены для привода насосов, турбокомпрессоров, воздуходувок и других быстроходных механизмов, работающих в закрытых помещениях.	630 – 2000	3000	S1
	СДН	Синхронные двигатели предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения.	250 – 5200	300 – 1500	S1
	АЗМ	Асинхронные трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором предназначены для привода насосов, нагнетателей, компрессоров, вентиляторов. Степень защиты IP44.	315 – 8000	3000	S1
	АЗМВ	Асинхронные взрывобезопасные двигатели с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка». Предназначены для привода стационарных насосов, компрессоров, углесосов и других механизмов во взрывоопасных зонах, в которых возможно образование взрывоопасных смесей газов, паров с воздухом 1, 2, 3 категории и групп Т1, Т2, Т3, Т4 или смесей пыли с воздухом.	500 – 5000	3000	S1
	АРМ	Асинхронные трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором. Предназначены для привода насосов, нагнетателей, компрессоров, вентиляторов. Степень защиты IP23.	315 – 8000	3000	S1
	АРМП	Асинхронные двигатели, продутые под избыточным давлением или наполненные взрывозащитным заполнением. Предназначены для привода высокоскоростных устройств: компрессоров, нагнетателей, стационарных насосов и другого оборудования.	315 – 8000	3000	S1

Продолжение Таблицы 1.3

		Для магистральных насосов		Для подпорных насосов	
ВА	Взрывозащищенные асинхронные трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором. Предназначены для внутренних и наружных установок, применяемых на взрывоопасных видах производств.	0,75 – 132	750, 1000, 1500, 3000	S1	
ВАН	Асинхронные трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором. Предназначены для привода вертикальных гидравлических насосов.	315 – 2500	375 500, 600, 750	S1	
ДВАН	Вертикальные асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором нормального исполнения с самовентиляцией. Предназначены для привода вертикальных центробежных и осевых насосов.	315 – 8000 (опционально)	300 – 1000	S1	
ДВАД	Вертикальные асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Двухскоростные двигатели с переключением частоты вращения. Предназначены для привода вертикальных центробежных и осевых насосов.	315 – 8000 (опционально)	600/500, 500/375, 300/250, 300/200	S1	
ДАЗО	Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Предназначены для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска, не требующих регулирования частоты вращения.	200 – 800	500, 600, 750, 1000, 1500	S1	
ДСВ	Двигатели синхронные вертикальные серии ДСВ трехфазного тока. Предназначены для привода насосов.	800 – 1250	500, 600	S1	
СДН	Синхронные двигатели предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (вентиляторов, насосов, дефибреров, и т.д.).	315 – 3200	300, 375, 500, 600, 750, 1000	S1	
ВАОВ	Асинхронные электродвигатели взрывозащищенные вертикальные. Предназначены для привода нефтяных подпорных насосов типа НПВ.	200 – 2000	1500	S1	
АОВ	Асинхронные электродвигатели трехфазные с короткозамкнутым ротором обдуваемые вертикальные. Предназначены для привода насосов.	132 – 2000	3000 – 750	S1	

		Для подпорных насосов			
A4	Высоковольтные асинхронные трехфазные электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором. Предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосов, вентиляторов, дымососов и др. с аналогичными пусковыми характеристиками).	200 – 1000	1500 – 600	S1	
AИМ	Асинхронные электродвигатели предназначены для привода стационарных машин, установленных во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок, в которых могут образовываться взрывоопасные смеси горючих газов или паров с воздухом, относящихся к категориям ПА, ПБ, ПС и группам самовоспламенения Т1, Т2, Т3 и Т4.	0,25 – 7,5	3000 – 1000	S1	
AИМЛ	Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором во взрывозащищенном исполнении с маркировкой по взрывозащите 1 ExdПВТ4. Предназначены для привода механизмов внутренних и наружных установок взрывоопасных производств, в которых возможно образование взрывоопасных паро- и газовоздушных смесей.	0,25 – 7,5	3000 – 1000	S1, допускается работа двигателей в режимах S2, S3, S4	
AИММ (+AИУ)	Двигатели асинхронные взрывозащищенные с короткозамкнутым ротором. Предназначены для работы от сети трехфазного переменного тока, частотой 50 Гц и 60 Гц для привода стационарных машин во взрывоопасных производствах.	1,5 – 132	3000 – 750	S1, допускается работа двигателей	
AИМР	Двигатели асинхронные взрывозащищенные АИМР160, 180 предназначены для взрывоопасных видов производств. Исполнение по взрывозащите IExdПВТ4.	7,5 – 30	3000 – 750	S1	
AИР	Асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, с частыми тяжелыми пусками и с высоким коэффициентом инерции, с неравномерной пульсирующей нагрузкой, требующих ступенчатого регулирования частоты вращения.	4 – 30	3000 – 500	S1 – S6	
AИРМ	Асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Предназначены для привода вентиляционного оборудования, насосов, компрессорных установок, станков, эскалаторов и др.	4 – 30	3000 – 500	S1 – S6	

1.3 Статистическая оценка и анализ повреждаемости АД в НГП

1.3.1. Статистика выхода из строя АД и их узлов

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), как электромеханический преобразователь, представляет собой систему, состоящую из двух узлов (статор и ротор), которые в свою очередь состоят из образующих их элементов (рисунок 1.4). Выход из строя одного узла влечет за собой ускоренную деградацию других узлов.

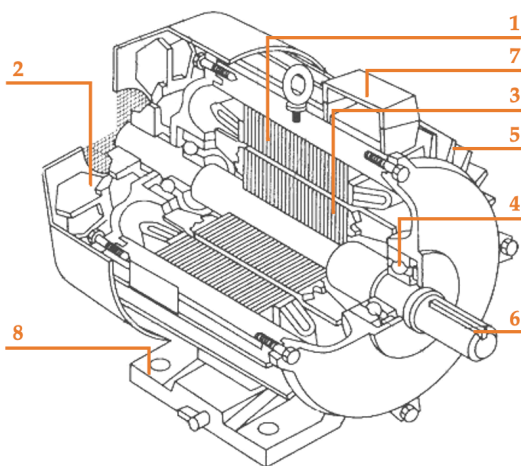


Рисунок 1.4 – Асинхронный двигатель: 1 – статор; 2 – крыльчатка вентиляции; 3 – короткозамкнутый ротор; 4 – подшипник; 5 – корпус с ребрами охлаждения; 6 – вал; 7 – коробка выводов обмоток статора; 8 – крепления (лапы)

Статистика выхода из строя двигателей переменного тока (рисунок 1.5) показывает, что для двигателей средней и большой мощности существует значительный разброс относительно установленного заводом-изготовителем паспортного срока службы [171]. При этом, зачастую причины раннего выхода из строя остаются не раскрытыми, а при значительном превышении срока службы встает вопрос об энергетической эффективности работы двигателя, реальном остаточном ресурсе и времени выхода из строя при фактических эксплуатационных параметрах и нагрузке.



Рисунок 1.5 – Статистика выхода из строя двигателей переменного тока для минерально-сырьевого комплекса. Данные из [171]

В основном в исследованиях неисправности АД делят на два класса в зависимости от природы возникновения: электрические и механические (рисунок 1.6).

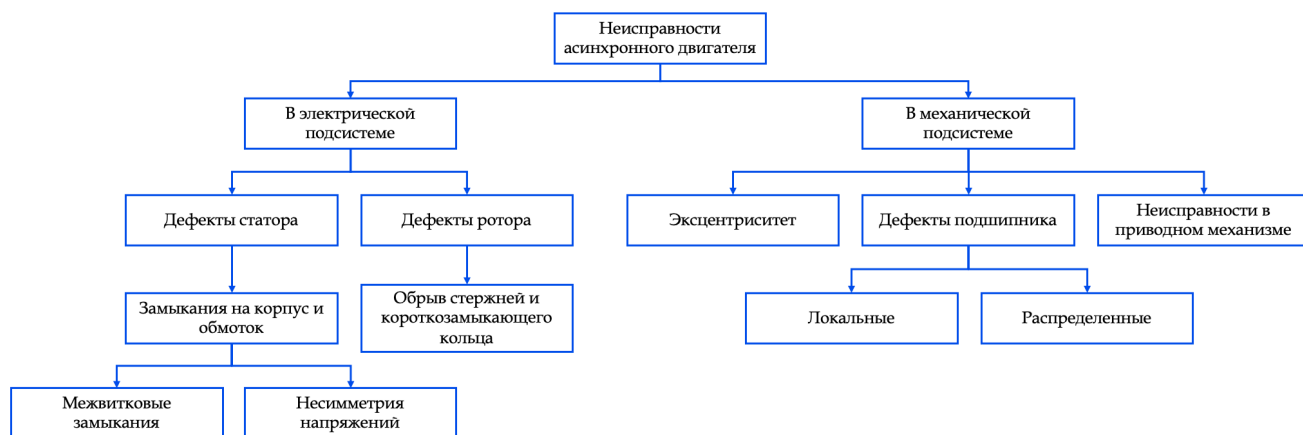


Рисунок 1.6 – Классификация неисправностей асинхронных двигателей [67, 116]

Наиболее распространенные дефекты двигателей представлены на рисунке 1.7. В большинстве работ [91, 100, 107] отмечается, что почти половина отказов спровоцирована выходом из строя подшипникового узла. Для трети всех дефектов двигателей причиной является неисправность статора, и в основном – межвитковыми короткими замыканиями (таблица 1.4). Необходимо обратить внимание, что сопоставимую долю составляют дефекты, вызванные внешними и неустановленными причинами.



Рисунок 1.7 – Распространенные дефекты двигателей [67, 91, 116, 119, 120]

При этом, существуют еще другие механические дефекты, которые обычно не попадают в статистику, но являются причиной возникновения неисправностей как в механической, так и электрической части, однако обнаружить их достаточно сложно. Среди них – ослабление креплений и несоосность валов электродвигателя (ЭД) и нагрузочного механизма. Среди неустановленных причин отказов (рисунок 1.7) 20% приходится на неисправный элемент, который не был обнаружен вовремя (или 2,5% от всех причин дефектов двигателей).

Учитывая увеличивающийся спрос на труднодоступные запасы, повышающиеся требования к безопасности производства в условиях старения и недофинансирования обновления основных фондов, а также тяжелые условия эксплуатации оборудования, крайне важно обнаружить и устранить неисправность для минимизации влияния на производительность и финансовые потери, поэтому необходимо развивать средства мониторинга и диагностики, позволяющие выявлять наличие дефектов на самой ранней стадии.

Таблица 1.4 – Механические и электрические неисправности в соответствии с узлами двигателя [67, 116]

		<i>Электрические</i>			<i>Механические</i>		
Факторы, приводящие к отказам	Отказы	Эффект	Факторы, приводящие к отказам	Отказы	Эффект		
Вибрация обмоток	Радиальное и тангенциальное смещение; Разрушение фиксаторов обмотки; Нарушение изоляции; Межвитковые замыкания	Появление сторонних шумов, повышенный износ механических частей машины	Эксцентриситет	Электромагнитный шум и вибрация; Повреждение целостности сердечника из-за трения со статором; Нарушение изоляции и перегрев зубцов	Появление сторонних шумов, повышенный износ механических частей машины		
Механическое повреждение изоляции	Замыкания на заземляющий проводник	Выход из строя машины, искрообр-е	Перегрев	Изменение характеристик сердечника; Потеря межфазной изоляции; Плавление изоляции; Разрушение фиксаторов обмотки; Снижение КПД; Повреждение магнитного сердечника при сборке	Выход из строя машины, искрообразование		
Переходные процессы	Нарушение изоляции	Выход из строя машины, искрообр-е	Слабая вентиляция	Перегрев	Выход из строя машины, искрообразование		
Утечка тока	Повреждение изоляции; Замыкание обмоточных проводов на землю; Появление токов в заземляющем проводнике; Выход заземления из строя	Выход из строя машины, искрообр-е	Неадекватное техническое обслуживание	Повреждение сердечника при намотке проводников; Перегрев деталей двигателя при техническом обслуживании	Изменение характеристик нормального режима работы машины и появление сторонних шумов		

Статор

Продолжение Таблицы 1.4

								Выход из строя машины, сцепление механических частей машины и смятие
Вибрация обмоток	Радиальное и тангенциальное смещение; Разрушение фиксаторов обмотки; Нарушение изоляции; Межвитковые замыкания	Механическое разрушение частей машин	Сбои в процессе работы машины	Нарушение целостности вала; Выход из строя подшипников, охлаждающего вентилятора и муфт; Трение ротора о статор; Центробежные и тепловые перегрузки; Перенапряжения в лопастях вентилятора и стержнях ротора	Выход из строя машины, сцепление механических частей машины и смятие			
Электромагнитные неисправности	Перемещения обмотки ротора, сопровождаемые прогибом и перенапряжением стержней	Выход из строя машины, сцепление механических частей машины и смятие	Смещение вала	Скручивание, излом, действие остаточных напряжений, перегрузка, повреждение деталей машины при ремонте или монтаже, эксцентриситет	Сцепление механических частей машины и смятие			
Нарушение изоляции	Замыкания на заземляющий проводник	Выход из строя машины, искрообразование	Статический и динамический эксцентриситет	Появление электромагнитного шума и вибраций; Повреждение сердечника ротора из-за механического трения о статор; Нарушение целостности подшипников; Протекание валовых токов; Искрение в нормальном режиме работы	Появление сторонних шумов, повышенный износ механических частей машины			
Магнитные неисправности	Нарушение целостности шин; Появление шумов; Появление магнитных вибраций; Деформация (скручивание) вала; Нарушение целостности подшипников; Механическое трение ротора о статор	Выход из строя машины, сцепление механических частей машины и смятие	Перегрев	Повреждение магнитного сердечника; Нарушение изоляции; Отказ подшипника	Выход из строя машины, искрообразование			
			Выход из строя подшипника	Эксцентриситет, появление электромагнитного шума и вибрации; Повреждение сердечника из-за трения о статор; Появление валовых токов; Искрение	Сцепление механических частей машины и смятие, выход из строя машины			
Ротор								

1.3.2. Анализ причин выхода из строя АД

В процессе эксплуатации асинхронные двигатели подвержены различного рода нежелательным воздействиям (таблица 1.5), в том числе обусловленными агрессивной средой.

Таблица 1.5 – Эксплуатационные факторы, оказывающие влияние на появление неисправностей в работе асинхронных двигателей – на основе [116]

Окружающая среда	Технологический процесс	Эксплуатация оборудования	Деятельность человека	Электрические явления
Температурный режим	Вибрации	Естественное старение и износ	Ошибки проектирования	Переходные процессы, вызванные: короткими замыканиями; колебаниями в сети электроснабжения; резонансом; коммутацией нагрузки; наличием емкостей в системе; нарушением изоляции; наличием частотных преобразователей и другой полупроводниковой техники
Условия влажности	Перегрузка	Качество применяемого оборудования	Неправильная эксплуатация	Провалы напряжения
Коррозия	Чрезмерное количество запусков	Нарушения целостности конструкции	Отсутствие ТОиР	Отклонение напряжения
Условия вентиляции	Регулирование нагрузки	Производственные дефекты	Неправильное ТОиР	Несимметрия питающих напряжений
Загрязнение	Резонанс системы	Неправильный монтаж	Использование некачественных деталей	Наличие высших гармоник в питающей сети
Механическое воздействие внешних предметов	Протекание валовых токов, трение статора и ротора, неполное снятие нагрузки	-	Редкое обновление смазочных материалов	Неисправность электроустановок в питающей линии

Естественно, воздействия на АД обусловлены технологическим процессом и сопряженным оборудованием. Так, насосное оборудование является одним из ключевых в обеспечении процессов нефтегазового сектора (рисунок 1.3), при этом до 30% отказов оборудования приходится на останов оборудования по причине

низкой производительности, отклонения параметров, и ненормальных показаний приборов по причине наличия скрытых дефектов или брака, а 0,87% – причины неизвестного характера (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Исследование OREDA по обнаружению неисправностей насосного оборудования в нефтегазовой отрасли – на основе [123]

Режим	(детализация режима)	Количество событий	Доля событий от эксплуатационного времени	Активные ремонтные часы
Критический		524	60,41	37,3
	Поломка	45	5,19	16,1
	Утечки внешние/внутренние	140	16,13	139,9
	Отклонение параметров	18	2,08	11
	Низкая производительность	46	5,3	35,4
	Вибрации	32	3,69	81,2
Пограничный (деградация – износ)		754	86,92	20,2
	Утечки внешние/внутренние	405	46,69	67,9
	Отклонение параметров	76	8,76	25,3
	Низкая производительность	37	4,27	7,9
	Вибрации	46	5,3	33,1
Зарождающийся		1124	129,58	10,3
	Утечки внешние/внутренние	190	21,91	79,8
	Отклонение параметров	24	2,77	9,3
	Низкая производительность	1	0,12	2
	Вибрации	12	1,38	9,9
Неизвестный		21	2,42	6,8

1.4 Анализ показателей энергетической эффективности асинхронного электропривода в системах транспортировки нефти

1.4.1. Влияние на энергоэффективность и надежность функционирования объектов транспортировки и добычи нефти

Электродвигатель со скрытыми дефектами не только потребляет больше энергии, но и оказывает дополнительное влияние на работоспособность сопряженного оборудования (насоса). Это влияние приводит к ускоренному износу всей электромеханической системы, и соответственно – к дополнительному росту затрат на электроэнергию [89]. В худших случаях продолжительная работа такой

системы на объектах транспортировки нефти может привести как к внезапному выходу из строя оборудования и внеплановым простоям, так и к угрозам жизни персонала – возгораниям и утечкам продукта.

Износ машин и механизмов также влияет на уровень энергосбережения, поскольку вид и уровень дефекта влияет на величину и допустимый рост потерь электроэнергии [33]. Потери энергии двигателя можно разделить на пять основных категорий: потери в сердечнике, потери на трение и вращение, сопротивление статора, потери на сопротивлении ротора, паразитные потери и нагрузочные потери.

Согласно энергетической диаграмме АД [7] (рисунок 1.8), сумма потерь определяет КПД двигателя, что может быть записано следующим образом (1.1):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}, \quad (1.1)$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая двигателем из сети;

P_2 – полезная мощность на валу двигателя;

$\sum p$ – сумма потерь, и определяется (1.2):

$$\sum p = p_{эл1} + p_{мг} + p_{эл2} + p_{мех} + p_{доб}, \quad (1.2)$$

где $p_{эл1}, p_{эл2}$ – электрические потери в обмотке статора и ротора соответственно;

$p_{мг}$ – магнитные потери;

$p_{мех}$ – механические потери;

$p_{доб}$ – добавочные потери.

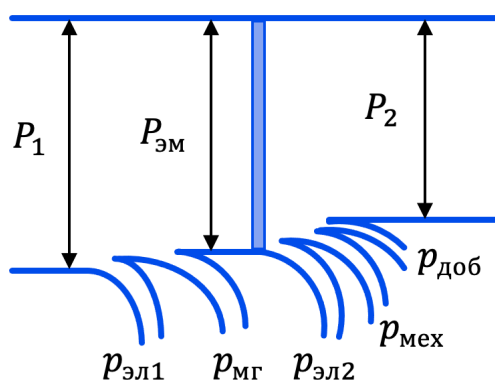


Рисунок 1.8 – Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя [26]

В таблице 1.7 приведен обобщенный диапазон потерь электроэнергии при критическом уровне различных дефектов. Критический уровень соответствует

предотказному состоянию ЭП, процент потерь мощности приведен от общей потребляемой мощности электротехнического комплекса, в состав которого входит ЭП. При этом неисправности приводят не только к затратам в виде дополнительной электроэнергии, но и провоцируют затраты, вызванные нарушением в технологии цикла на следующих этапах производства, что приводит к росту себестоимости конечного продукта.

Таблица 1.7 – Предельные значения потерь электроэнергии электропривода насосной установки при наличии дефектов [160, 161, 162]

Компоненты электропривода	Дефекты	Потери электроэнергии, %
Преобразователь частоты	Пробой силовых ключей	до 50 %
	Потеря управления силовыми ключами	20 %
	Нарушения охлаждения	5-7 %
Электродвигатель	Короткое замыкание (межфазное, межвитковое, на корпус)	30 %
	Износ подшипников	10-15 %
	Разрыв стержней ротора	20 %
	Несоосность валов	7-10 %
Рабочий орган	Кавитация насоса	до 10 %
	Внешние раковины	до 10 %
	Лопасты	до 10 %

Задачами технического диагностирования электромашинных агрегатов является контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирования технического состояния [14]. Повышение надежности достигается за счет раннего обнаружения дефектов и повреждений, что позволяет устранить их при ремонте и исключить отказы во время работы. Повышение технического ресурса систем ответственного назначения обеспечивается за счет перехода к их техническому обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию. В литературе [74] показано, что переход к эксплуатации по состоянию способен принести выгоду, эквивалентную 30 % общего парка машин.

1.4.2. Влияние наличия дефектов ЭМО на эффективность технологического процесса

На основе анализа, выполненного в предыдущих разделах, составлена схема влияния наличия дефектов электромеханического оборудования на эффективность технологических процессов и ключевые показатели эффективности компании (рисунок 1.9).

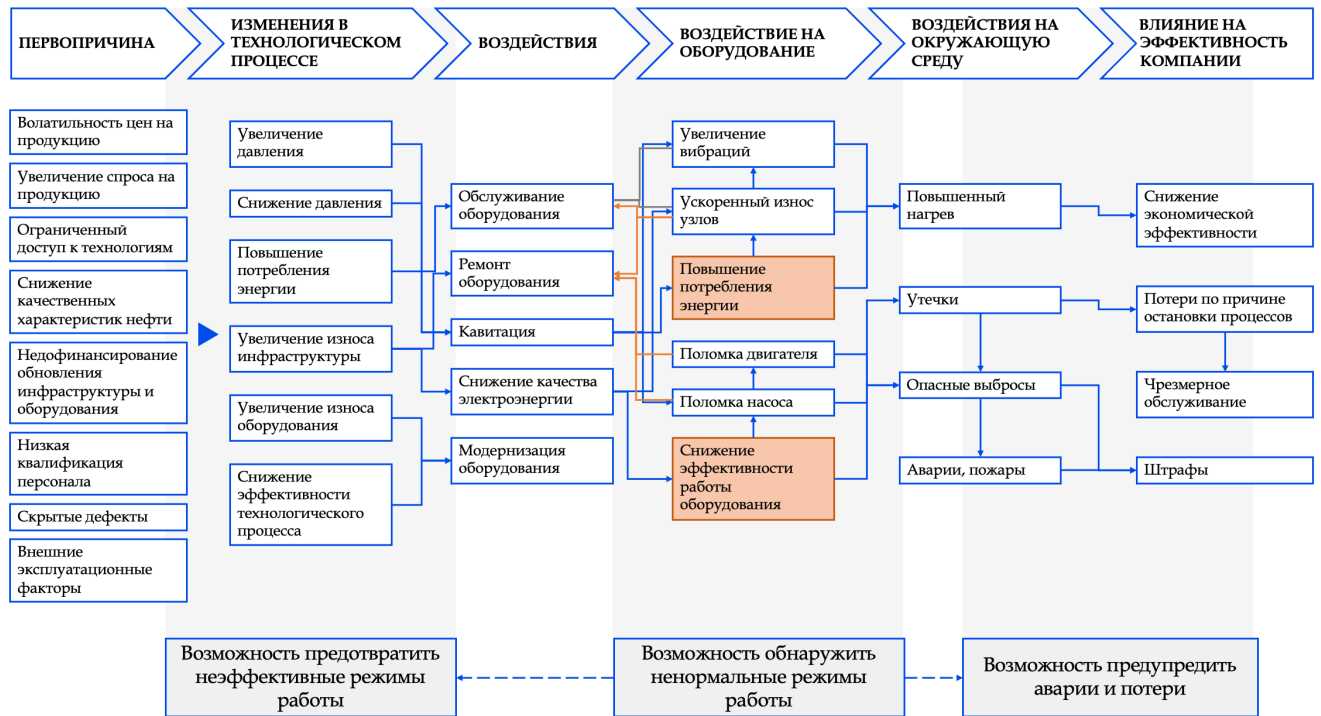


Рисунок 1.9 – Схема влияния наличия дефектов оборудования на эффективность компании

Благодаря данной схеме можно проследить траекторию, как и по каким причинам увеличение износа оборудования и инфраструктуры, включая асинхронный двигатель, приводят к отрицательным последствиям до воздействия на окружающую среду. Таким образом, с учетом продолжительного режима работы электрических машин в нефтегазовой промышленности и длину жизненного цикла эксплуатации, составляющую более 12-20 лет [15], наличие развивающихся дефектов приводит к снижению эффективности технологических процессов и ключевых показателей эффективности всей компании.

На схеме также выделены этапы, на которых возможно вмешательство с целью предотвращения аварийных событий и электроэнергетических, технологических и экономических потерь, что возможно при распознавании

признаков изменения состояния и уровня энергетической эффективности АД на более ранних этапах.

1.4.3. Определение показателей энергетической эффективности асинхронного электропривода в системах транспортировки нефти

Показатель (показатели) энергетической эффективности – абсолютная, удельная или относительная величина потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса [16]. В соответствии с Федеральным законом об энергосбережении от 23.11.2009 N 261-ФЗ, показатели энергетической эффективности являются определением эффективности потребления энергетических ресурсов. Энергетическая эффективность – группа характеристик, отражающих отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю [1].

Наибольшая доля от объема затрат нефтетранспортных компаний в процессе эксплуатации нефтепроводов приходится на нефтеперекачивающие станции как в энергетическом, так и в денежном выражении. В трубопроводном транспорте нефти расход электроэнергии укрупненно делится на два процесса: потребление электроэнергии насосными агрегатами $W_{НА}$ (при перекачке нефти), что составляет приблизительно 95% общего расхода; и на собственные нужды нефтеперекачивающих станций (НПС), линейных производственно-диспетчерских станций (ЛПДС) $W_{СН}$ – соответственно, около 5%. Тогда общее количество потребляемой электроэнергии (1.3):

$$W = W_{НА} + W_{СН}. \quad (1.3)$$

Структура расхода электроэнергии на транспортировку (перекачку) нефти выглядит следующим образом:

- минимально необходимый расход на расчетно-оптимальном режиме $W_{\text{мин.н}}$;

- расход на циклическую работу нефтепровода, связанную с периодической остановкой перекачки W_2 ;
- расход, связанный с режимными затратами W_3 ;
- расход, обусловленный отклонением фактических характеристик насосного агрегата (НА) от паспортных (каталожных) $W_{\text{КПД}}$;
- расход, связанный с неравномерностью работы, в связи с проведением ремонтных работ $W_{\text{нер}}$;
- расход, связанный с технологическими затратами $W_{\text{техн}}$.

Тогда потребление электроэнергии насосными агрегатами (1.4):

$$W_{\text{НА}} = W_{\text{мин.н}} + W_2 + W_3 + W_{\text{КПД}} + W_{\text{нер}} + W_{\text{техн}}. \quad (1.4)$$

Основные группы потребителей электроэнергии из данной части расходов приведены на рисунке 1.10:

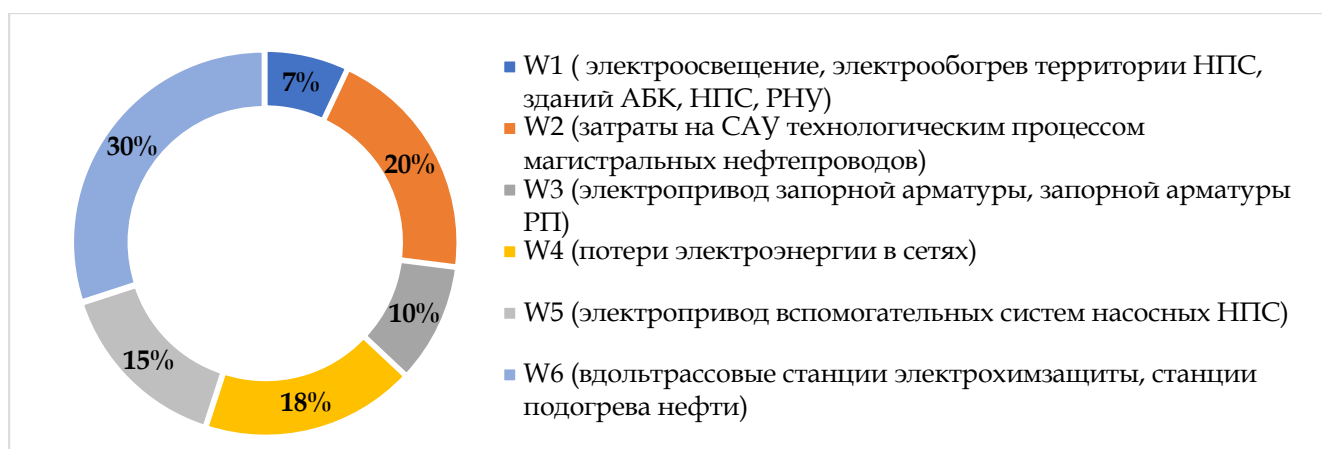


Рисунок 1.10 – Распределение основных групп потребителей электроэнергии при перекачке нефти

Потребление электроэнергии на собственные нужды нефтеперекачивающими станциями является сезонным, для российских климатических широт характерно увеличение потребления в зимние месяцы до 2,5 раз. Это может быть обусловлено необходимостью поддерживать температуру нефтепродукта по трассе трубопровода и использованием электрических станций подогрева нефти. Констатируем, что большую часть потребления составляют

двигатели, при этом на потребление оказывает влияние КПД двигателей, который может быть связан как с отклонением от номинальных режимов, так и с изменением технического состояния [45].

При расчетах затрат энергии, потребляемой системами электропривода, важно понимать режим работы; режимы определяет график нагрузки.

Установлено, что потребление электроэнергии и мощности на НПС носит нелинейный характер. В зависимости от наличия необходимости поддержания заданного режима работы нефтепровода может увеличиваться потребляемая активная мощность [4].

Для примера, на рисунке 1.11 приведен график среднего потребления активной мощности НПС в течение суток.

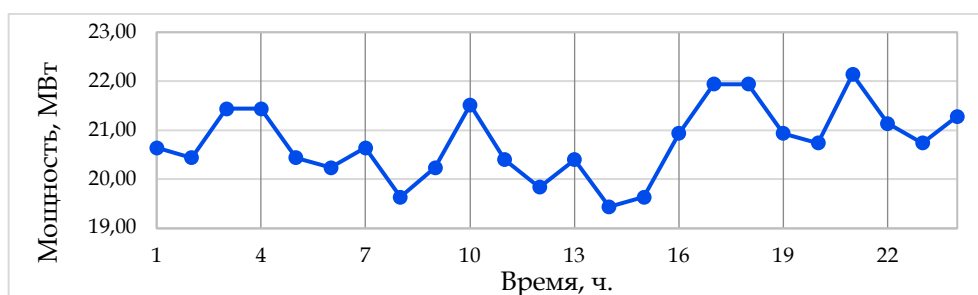


Рисунок 1.11 – График среднего потребления активной мощности НПС

Для объектов линейной части потребление активной мощности менее подвержено колебаниям в течение дня, а изменения обусловлены преимущественно кратковременными включениями электроприводов запорной арматуры. Для примера, на рисунке 1.12 приведен график среднего потребления активной мощности объектами линейной части (ЛЧ) нефтепровода в течение суток.

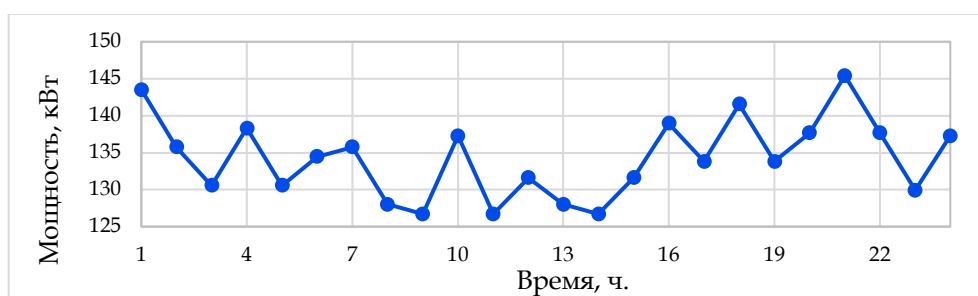


Рисунок 1.12 – График среднего потребления активной мощности ЛЧ нефтепровода

Расчет удельных показателей расхода электроэнергии для перекачки 1 тонны на 1 километр по трассе нефтепровода производится на основе среднего объема перекачиваемой нефти и нефтепродукта (пример на рисунке 1.13).

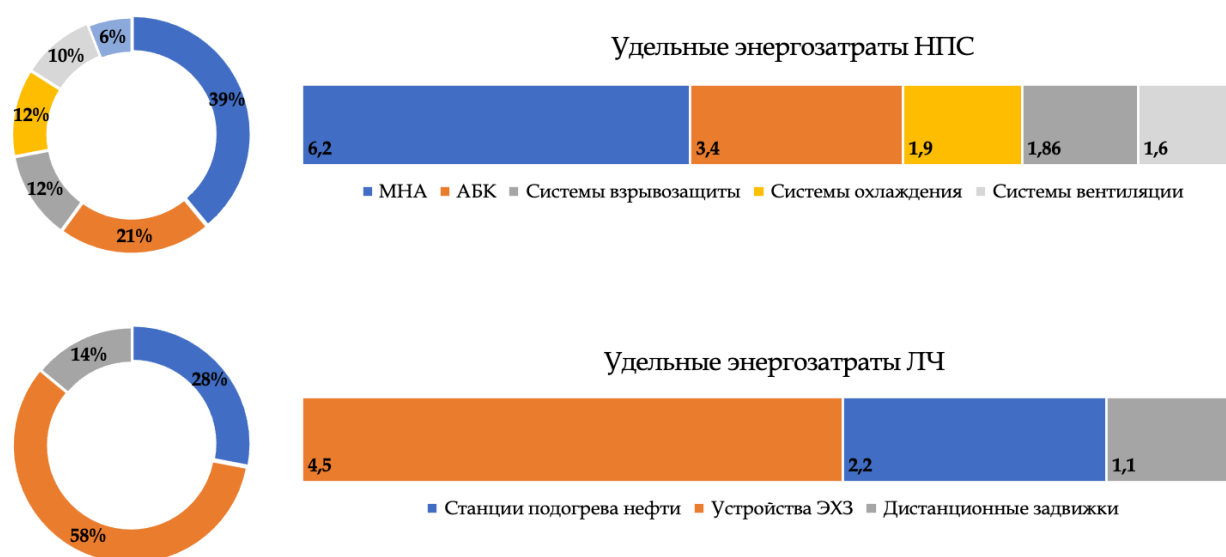


Рисунок 1.13 – Пример расчета удельных показателей расхода электроэнергии

Учитывая проведенный анализ состояния НПП, сценарный анализ рисков и разработанную схему влияния наличия дефектов оборудования на эффективность компании (рисунок 1.9) установлено, что внешние факторы оказывают воздействие на уровень износа оборудования, что приведет к увеличению количества аварийных ситуаций и снижению уровня энергетической эффективности по причине значительного количества оборудования, работающего с дефектами и в предаварийном состоянии. Установлено, что для оценки показателя энергетической эффективности при транспорте нефти используется кВт · ч/т, а для системы электропривода – КПД (η) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

1.5 Выводы по главе 1

На основе приведенного анализа установлено:

1. Асинхронный двигатель в составе электропривода является основным потребителем электроэнергии на предприятиях нефти и газа и составляет до 60% общего потребления электроэнергии. Режим работы используемых двигателей в отрасли в основном характеризуется как продолжительный в течение длительного времени, средний срок эксплуатации составляет 12-20 лет.

2. На основе проведенного сценарного анализа установлено: повышение эффективности эксплуатации электромеханического оборудования критически необходимо для экономической эффективности всего нефтегазового сектора. В негативном сценарии вероятен рост энергетических потерь в отрасли до 30%, а также кратное повышения уровня аварийности и травмоопасности на производственных объектах.

3. По результатам проведенного анализа исследований российских и зарубежных авторов выявлено, что износ энергетической инфраструктуры вырос на 10,5% за последние 15 лет. При этом, в нефтегазовой сфере уровень износа основных фондов составляет 58%, а недофинансирование в реновацию – более 1.6 млрд. руб.

4. Установлено наличие существенных рисков при увеличении количества добываемой и транспортируемой нефти при отсутствии необходимых финансовых средств в обновлении основных фондов; нарастание как аварийных ситуаций, так и значительного снижения уровня энергетической эффективности, что подчеркивает необходимость создания методов обнаружения повреждений на ранней стадии, а также выявления уровня потерь, обусловленных повреждениями для своевременного принятия решений в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов.

5. Основными причинами выхода из строя АД является выход подшипникового узла – 40%, неисправности статора – 26%. Более 20% выхода из строя асинхронных двигателей и остановка насосного оборудования вызваны неустановленными причинами. Определено, что обнаружение дефектов, только на основе отклонений эксплуатационных параметров асинхронного электродвигателя неэффективно, поскольку не позволяет выявлять раннюю стадию возникновения дефекта. Это определяет актуальность развития методов раннего обнаружения как наиболее часто встречающихся неисправностей, так и начальной стадии редко происходящих событий, которые не обнаруживаются на длительном промежутке работы и приводят к внезапной остановке технологического процесса.

6. Установлено, что двигатель при наличии дефектов оказывает дополнительное влияние на работоспособность сопряженного оборудования, приводит к экономическим потерям при выходе из строя сопряженного механизма, а также в виде дополнительных потерь электроэнергии в самом электрическом двигателе, что приводит к росту себестоимости конечного продукта и рисков возникновения аварийных событий.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ДИАГНОСТИКИ АД И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО СИГНАЛАМ ТОКА СТАТОРА

2.1 Моделирование и анализ влияния наличия дефекта на энергетические характеристики АД

2.1.1. Виды неисправностей обмотки статора

Согласно разделу 1.4 и учитывая срок службы машин, такая долгосрочная выгода как снижение энергопотребления, может играть значительную роль в повышении общего уровня энергетической эффективности предприятий. В работах ученых [89, 133] подчеркивается, что наличие дефектов как в электрической, так и в механической части АД приводит к увеличению потерь электроэнергии. Учитывая, что в последующих главах проводится ряд экспериментов по реализации дефектов подшипника, несоосности и ослабления крепления, рассмотрим изменение энергетических характеристик при повреждении обмотки статора, как наиболее из часто встречающихся неисправностей согласно проведенному в предыдущей главе обзору.

Неисправности в обмотках статора составляют до 30% (рисунок 1.7) и появляются в основном из-за короткого замыкания обмотки, вызванные нарушением изоляции (таблица 1.4). Обмотка статора состоит из катушек изолированной медной проволоки, размещенной в пазах статора.

Повреждение изоляции обмоток может произойти от длительного перегрева двигателя, увлажнения и загрязнения обмоток, попадания на них металлической пыли, стружек, а также в результате естественного старения изоляции. Повреждение изоляции может вызвать замыкание между фазами и витками отдельных катушек обмоток (рисунок 2.1), а также замыкание обмоток на корпус двигателя. Увлажнение обмоток возникает при длительных перерывах в работе двигателя при непосредственном попадании в него воды или пара в результате хранения двигателя в сыром и неотопляемом помещении и т. д.

Загрязнение обмоток электродвигателя происходит от попадания воздуха с пылью внутрь электродвигателя. Пыль образует токопроводящие мостики, которые могут вызвать перекрытие или замыкание обмотки на корпус. Длительный перегрев машины приводит к тому, что изоляция обмоток становится хрупкой и гигроскопичной.

При этом электродинамические силы, развивающиеся при коротких замыканиях, а также перенапряжения, возникающие в питающей сети и при выключениях обмоток возбуждения, могут вызвать перекрытие обмоток электрической дугой и пробой на корпус.



Рисунок 2.1 – Виды повреждения обмотки статора [65]

Межвитковый или короткозамкнутый виток, замыкающий несколько близлежащих витков фазной обмотки, приводит к нарушению изоляции в статоре машины. Ток, циркулирующий в короткозамкнутых витках, приводит к повышению температуры в зоне воздействия, поскольку двигатель продолжает работать. Повышение температуры приводит к дальнейшему развитию повреждения изоляции. Замыкание в витках может перерасти в короткое замыкание между двумя катушками одной фазы, что в последствии приводит к короткому замыканию между витками двух фаз.

Межфазные КЗ в обмотках статора являются основными видами повреждений в АД, но они являются конечным этапом развития повреждения, которому предшествуют описанные воздействия и проявляющиеся дефекты. Они сопровождаются значительными токами, которые вызывают разрушение обмоток и стали двигателя. Простейшим случаем двухфазного КЗ является металлическое

замыкание двух фаз в одной точке. Более сложный случай – замыкание двух фаз через переходные сопротивления в одной или разных точках сети. При понижении сопротивления изоляции относительно корпуса и последующем замыкании фазы на корпус электродвигателя, двигатель может продолжать работать, если неправильно выполнены заземление и защита от короткого замыкания [18].

При замыканиях в обмотках двигателя вращающееся магнитное поле в короткозамкнутом контуре наводит ЭДС, увеличивая протекающий в контуре ток, зависящий от сопротивления контура. При этом сопротивление поврежденной фазы будет меньше, чем исправной, что вызывает несимметрию. Это приводит к дополнительному нагреву обмоток двигателя при включении и замедлению его скорости вращения. Короткие замыкания возникают между хомутками лобовых частей, а также между стержнями при пробое или ослаблении изоляции в обмотке ротора.

2.1.2. Моделирование снижения сопротивления изоляции обмотки статора на корпус

Поскольку в современной литературе не уделяется должного внимания анализу потерь при появлении неисправностей, проведем исследование подтверждающее, что повреждения в обмотке статора вызывают асимметрию фазных напряжений и отклонение параметров схемы замещения от номинальных значений, что в свою очередь приводит к ухудшению энергетических характеристик и росту потребления энергии. Отметим, что наличие данного дефекта не приводит к реагированию систем защиты по току и напряжению, поскольку значения токов и напряжений не превышают уставок.

Для оценки изменения энергетических характеристик электропривода при наличии дефекта построена имитационная модель. Для выполнения исследования использовались для сравнения данные, экспериментально полученные в работах исследователей, в которых проведены измерения активных и индуктивных сопротивлений асинхронного двигателя при различных замыканиях в обмотке статора [155].

В соответствии с паспортными данными АДКЗР выполнен расчет параметров схемы замещения [34]. Результаты расчета сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

L_s , Гн	L_r , Гн	L_m , Гн	R_s , Ом	R_r , Ом
0,1453	0,1473	0,1400	0,5212	0,3051

где 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.

Математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ представлено системой уравнений (2.1), включающей уравнения электромагнитного равновесия, уравнения связей токов с потокосцеплением и уравнения электромагнитного момента и движения [25]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -R_r I_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -R_r I_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} I_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r\alpha} \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r\beta} \\ I_{r\alpha} = -\frac{k_r}{\sigma L_r} \psi_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} \psi_{r\alpha} \\ I_{r\beta} = -\frac{k_r}{\sigma L_r} \psi_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} \psi_{r\beta} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$M = 1.5zL_m(I_{r\alpha}I_{s\beta} - I_{r\beta}I_{s\alpha})$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_c}{J},$$

где $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – проекции вектора потокосцепления статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, Вб;

$U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}$ – проекции вектора напряжения статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, В;

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}, I_{r\beta}$ – проекции вектора тока статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, А;

R_s, R_r – активное сопротивление обмотки статора и ротора, Ом;

ω_r – частота вращения ротора, (рад/с);

σ – коэффициент рассеяния, о.е.;

$k_s = L_m/L_s$ – коэффициент рассеяния статора, о.е.;

$k_r = L_m/L_r$ – коэффициент рассеяния ротора, о.е.;

Моделирование нерегулируемого асинхронного электропривода проводилось при имитации появления тока утечки за счет повреждения фазной обмотки статора (рисунок 2.2) в ПО *Simulink MATLAB*.

Поведение системы электропривода исследовалось при частичном замыкании фазы А на корпус электродвигателя за счет изменения активного сопротивления фазы на землю в блоке короткого замыкания. Далее выполнена оценка показателей энергетической эффективности после выхода двигателя на номинальную скорость вращения, дальнейшим кратковременным набросом номинальной нагрузки и последующим набросом максимальной нагрузки. Изменение сопротивления короткого замыкания не приводит к потере работоспособности электропривода или к срабатыванию защиты.

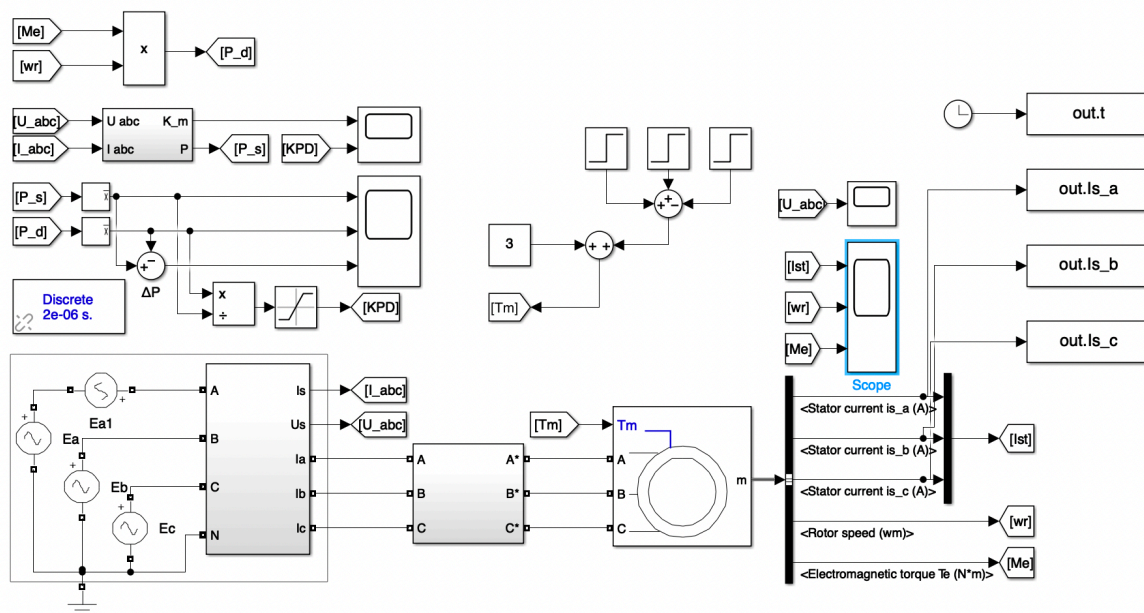


Рисунок 2.2 – Имитационная модель работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

На представленной имитационной модели выполнялось моделирование работы асинхронного двигателя с учетом формул (2.1) без управления частотой вращения, при питании от синусоидального напряжения промышленной частоты

50 Гц. При постепенном изменении R в цепи тока утечки с шагом 10% фиксировались энергетические характеристики электропривода, которые представлены ниже (рисунки 2.3, 2.4).

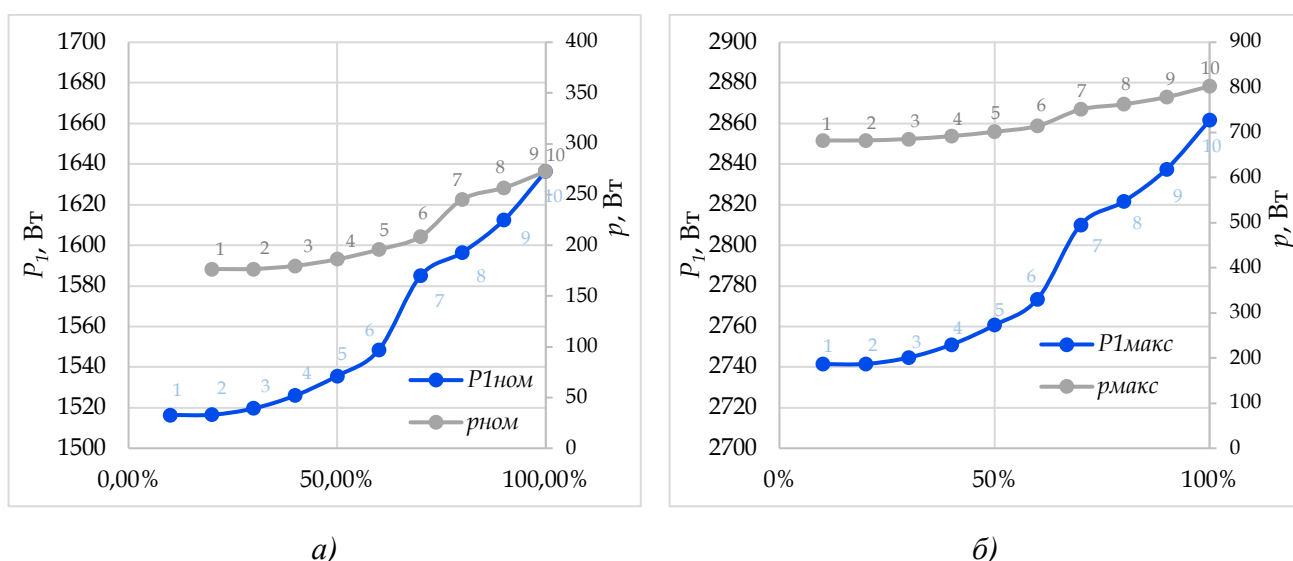


Рисунок 2.3 – Изменение потребляемой мощности и потерь электропривода по мере развития замыкания обмотки на корпус: а) – при номинальной нагрузке; б) – при максимальной нагрузке

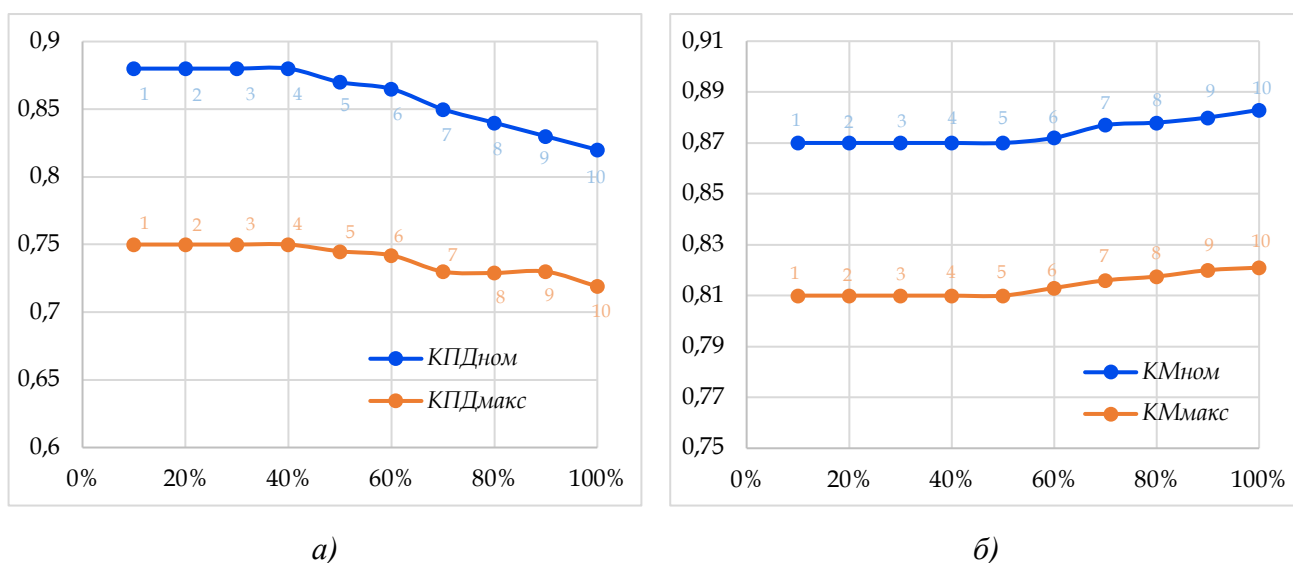
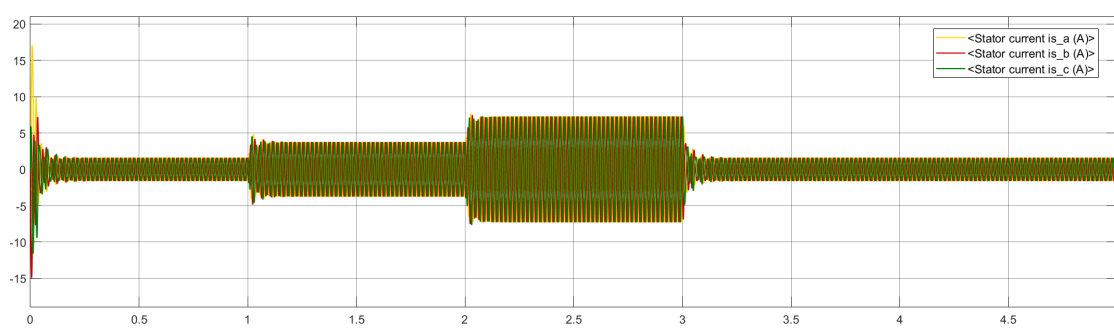


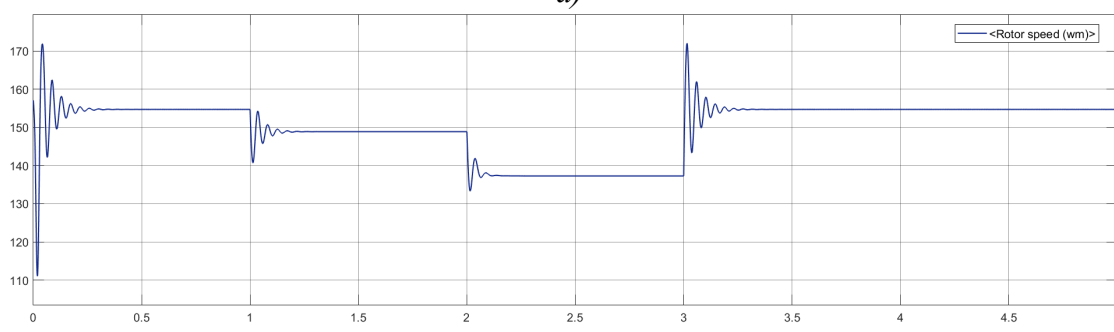
Рисунок 2.4 – Изменение энергетических характеристик электропривода по мере развития замыкания обмотки на корпус: а) – КПД при номинальной и максимальной нагрузках; б) – коэффициент мощности при номинальной и максимальной нагрузках

Энергетические характеристики нерегулируемого электропривода оценивались с учетом коэффициента полезного действия (КПД), коэффициента мощности (КМ), потребляемой активной мощности электропривода и потерь электроэнергии. Начальная точка (1) на рисунках 2.3-2.4 соответствует исправному состоянию машины. По мере уменьшения сопротивления (точки 2-10) ток КЗ

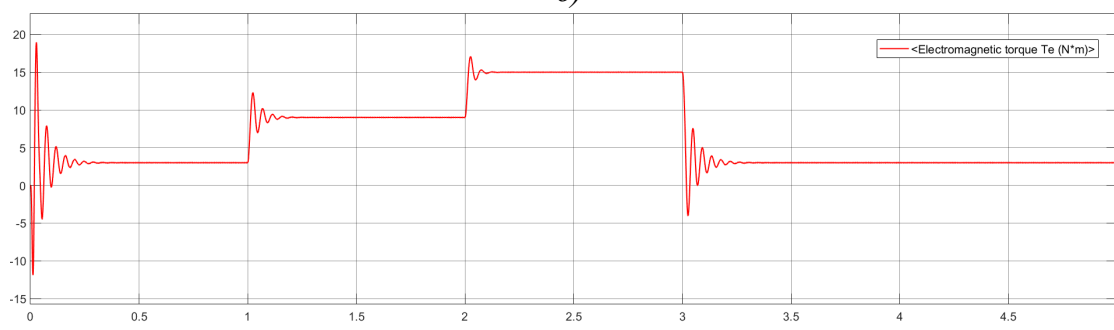
увеличивается, крайняя точка соответствует режиму, при котором срабатывает тепловая защита по току. Появление частичного замыкания на корпус электродвигателя ввиду повреждения изоляции обмотки статора приводит к ухудшению энергетических характеристик. Это доказывает влияние дефекта, в данном случае обусловленного повреждением изоляции статора, на потери электроэнергии. Частичное повреждение обмотки не приводит к существенному отклонению электромеханических параметров электропривода, к выходу из строя машины или к срабатыванию защиты, но ведет к неэффективной эксплуатации оборудования (рисунок 2.5).



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 – Электромеханические характеристики электропривода для уровня повреждения 50%: а) – токи обмотки статора; б) – скорость двигателя; в) – электромагнитный момент двигателя

Со временем поврежденный участок будет увеличиваться, что приведет к пробоем обмотки статора и к развитию междуфазного замыкания (отказу). Таким образом, чем раньше будут обнаружены неисправности, связанные с обмоткой статора, тем эксплуатация электрической машины будет безопасней. Если это не будет обнаружено вовремя, это приведет к более серьезной неисправности и, в дальнейшем, к случайному отключению оборудования. При этом, существование дополнительных потерь, обусловленных постепенной деградацией изоляции, приводит к снижению показателей энергетической эффективности системы электропривода и технологического процесса.

Учитывая анализ внешних факторов в разделе 1.3., констатируем вывод о существенных рисках при увеличении количества добываемой и транспортируемой нефти при отсутствии необходимых финансовых средств в обновлении основных фондов; нарастание как аварийных ситуаций, так и значительного снижения уровня энергетической эффективности, что требует создания методов обнаружения повреждений на ранней стадии, а также выявления уровня потерь, обусловленных дефектами для своевременного принятия решений в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов.

Поэтому необходимо рассмотреть методы обнаружения повреждений на ранней стадии для того, чтобы исключить существование потерь на длительном промежутке времени и повысить энергетическую эффективность привода.

2.2 Обзор существующих методов диагностики асинхронного электропривода

Среди существующих методов диагностики электродвигателей в последние годы завоевали популярность следующие: акустический метод, тепловизионный контроль и анализ сигналов вибрации, а для высоковольтных машин – также анализ частичных разрядов.

Во время работы электродвигатели генерируют вибрации, среди которых возникают нежелательные, нарушающие работу электромеханической системы, что приводит к таким повреждениям, как дисбаланс, износ и несоосность [108, 125]. Анализ вибрации стал эффективным методом контроля состояния и производительности машины и считается лучшим методом определения состояния

машины [41, 42, 72]. По исследованию Saucedo-Dorantes et al. [130], до 82% методик диагностики неисправностей строятся на виброанализе. Вибрационные сигнатуры машин содержат важную информацию, включая источник неисправности машины и степень износа. За прошедшие годы было предложено множество подходов [2, 24] к анализу данных о вибрации машин, и каждый подход имеет свои характеристики, преимущества и недостатки. Методы, в значительной степени зарекомендовавшие себя в данном направлении, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Распространенные методы обработки сигнала вибрации для обнаружения неисправностей АД [91]

Название	Описание
FFT (Fast Fourier transform) – быстрое преобразование Фурье (БПФ)	Преобразует сигнал из его исходной области (часто временной или пространственной) в представление в частотной области и наоборот. БПФ получается путем разложения последовательности значений на составляющие с разными частотами.
ННТ (Hilbert–Huang transform) – преобразование Гильберта-Хуанга	Линейный, инвариантный к сдвигу оператор Н, который отображает все одномерные косинусные функции в соответствующие им синусоидальные функции.
EMD (Empirical Mode Decomposition) – эмпирическая модовая декомпозиция	Является частью преобразования Гильберта-Хуанга. Представляет собой итерационную вычислительную процедуру, в результате которой исходные данные (непрерывный или дискретный сигнал) раскладываются на эмпирические моды или внутренние колебания, которые вычисляются в ходе процесса.
VMD (Variational mode decomposition) – вариационная модовая декомпозиция	Выполняет декомпозицию сигнала на дискретное число подсигналов (мод) с ограниченной полосой пропускания и особыми характеристиками разреженности при воспроизведении входного сигнала: каждой моде соответствует своя ширина полосы в спектральной области, которая определяется вместе с разложением.
WT (Wavelet transform) – вейвлет-преобразование	Содержит информацию, аналогичную кратковременному преобразованию Фурье, но с дополнительными особыми свойствами вейвлетов, проявляющимися в разрешении во времени на более высоких частотах анализа базисной функции.

При использовании EMD в сигнале декомпозиции возникают проблемы смешивания мод, что существенно затрудняет анализ полученных составляющих [148]. Для VMD необходимо знание о количестве режимов – это влияет на результат разложения, точность, расход вычислительных ресурсов и времени [98]. Сочетание EMD с другими методами позволяет более эффективно извлечь признаки сложных неисправностей [142]. Однако для любого метода анализа

сигнала вибрации недостатком является сложность реализации, связанная с использованием датчиков вибрации, что предъявляет жесткие требования к месту их установки и требует дополнительных кабелей для связи с блоком обработки данных.

В общем случае методы обнаружения дефектов и неисправностей включают в себя три этапа: выделение сигнала неисправности, обработка сигнала (усиление сигнала) и идентификация неисправности. Эти методы можно разделить на две основные группы: методы, основанные на моделях, и методы, управляемые данными (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Обобщенные методы, применяемые для мониторинга и обнаружения неисправностей электромеханического оборудования [82]

Прикладные методики	Методы, основанные на фактических данных	Методы, основанные на информационных моделях	Гибридные модели
Фундаментальные основы методик	Эмпирические модели, построенные в основном на основе статистических данных процесса	Модели процесса, построенные по принципу модели входа-выхода или модели пространства состояний (функциональное моделирование процесса)	Объединение подходов, основанных на данных и моделях
Классификация методик	Статистические методы, Методы искусственного интеллекта	Параметрический метод оценки (отслеживание изменения конкретного или набора параметров)	
	Методы нейронных сетей, Методы нечеткой логики	Метод, основанный на наблюдении (отслеживание изменения переменных состояния)	
	Комбинации методов	Метод паритетных отношений (проверка соответствия модели реальному процессу)	

В соответствии с таблицей 2.3, статистические модели предполагают, что процесс деградации подчиняется определенной математической функции и распределению, а затем параметры соответствующей функции и распределения оптимизируются с использованием всех данных о деградации оборудования рассматриваемого класса. Полученная на этой основе статистическая модель используется для прогнозирования состояния физического объекта / процесса или остаточного ресурса. Модели, построенные на основе закономерностей, полученных из наборов данных, имеют преимущества широкой применимости и

высокой точности прогнозирования состояния физического объекта / процесса и остаточного ресурса, а также не требуют создания физической модели [21]. Соответственно, в нефтегазовой промышленности и во многих других отраслях в последние десятилетия особый интерес был вызван применением нейронных сетей и использованием инструментов искусственного интеллекта, а также изучение комбинаций подходов для обнаружения дефектов и прогнозирования остаточного ресурса оборудования [150].

На основе проведенного литературного обзора установлено, что в будущем будет широко применяться сочетание статистических характеристик во временной области и подходов к глубокому обучению, когда признаки неисправности могут быть автоматически извлечены из сигналов. Литературный обзор показал, что методы, используемые при обработке сигналов средствами искусственного интеллекта (ИИ), зачастую схожи для сигналов разной природы [114]. Например, искусственные нейронные сети обратного распространения используются как при анализе вибраций, так и при анализе тока статора (таблица 2.4).

Подходы к машинному обучению можно разделить на два вида: контролируемое обучение («с учителем») и неконтролируемое («без учителя»).

Контролируемые модели, то есть обучаемые с помощью предварительно размеченных данных, такие как неглубокие или глубокие искусственные нейронные сети (ИНС), широко применяются для диагностики неисправностей вращающихся машин [111]. В этих приложениях сигналы собираются от оборудования в различных состояниях, с целью построения модели классификации, чтобы при совпадении с одним из имеющихся в модели состояний, определить и разделить будущие сигналы с максимальной точностью. Поэтому в большинстве моделей все классы отказов известны заранее.

Таблица 2.4 – Обзор применения алгоритмов машинного обучения для обнаружения дефектов электрических двигателей [116]

Сигнал	Прикладные методики		Неисправности						
			Обрыв стержней ротора	Повреждение подшипников	Эксцентриситет	Дисбаланс	Короткое замыкание обмоток	Несимметрия напряжения	Прогнозирование деградации узлов
Тока статора	ANN	Прямое распространение	+	+	+	+			
		Рекуррентная динамика		+	+		+		
		Адаптивная линейная сеть	+	+		+			
		Обратное распространение					+		
	Нечеткая логика						+	+	
	Hybrid systems	Нейронные сети с прямой связью (системы с многослойными рецепторами)					+		
	Нечеткое множество		+	+	+		+		
Вибрационный	ANN	Обратное распространение				+			+
		Нейронные сети с многослойными рецепторами	+						
	SVM	Методы опорных векторов		+	+	+			
		Преобразование Гильберта-Хуанга, алгоритм построения гиперплоскостей		+					
		Рассеянное представление		+					
		Разложение вейвлет-пакета		+					
	KNN	Метод k-средних				+			
	Гибридные системы	Нечеткие числа двунаправленного типа, нечеткая логика, искусственные нейронные сети, Вейвлет-анализ		+					
Адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода (ANFIS)			+	+					

Неконтролируемые модели, такие как k-средние, используются для автоматического обнаружения неисправности, но в подобных моделях

рассматриваются только два определяемых класса состояния объекта, который характеризуется наборами размеченных данных: исправный или поврежденный, без установления уровня дефекта. Поэтому определение уровня обнаруженного дефекта не происходит автоматически, а требует вмешательства человека.

На основе таблицы 2.4 и литературного обзора установлено: многие подходы хорошо проявляют себя в корреляционном анализе, но не способны установить причинно-следственной связи и неустойчивы к перемене условий. Также многие методы привязаны к ограниченному набору узлов ЭД и их дефектам. Большинство способов не устойчивы к обнаружению и декомпозиции комбинаций дефектов. Практически все подходы требуют информации о произошедших повреждениях [109, 116].

Таким образом, не обнаружено единого метода, позволяющего диагностировать одновременно несколько типов неисправностей, рассмотренных в разделе 1.1. Большинство рассмотренных методов диагностики не определяют источники возникновения дефекта и не выявляют уровень его изменений.

Отсутствие меток (привязки определенных наборов данных к наличием повреждений), указывающих на фактическое наличие дефектов, а также отсутствие данных по всем режимам работы ЭД при наличии всех видов неисправностей ограничивает использование моделей машинного обучения «с учителем». Точность этих моделей со временем снижается из-за их плохой способности обучаться на текущих данных и адаптироваться к нескольким сценариям. Учитывая эти проблемы, диагностика, основанная на множестве размеченных данных, может оказаться неэффективной и неприменимой в реальных приложениях. Другими словами, необходимы средства, способы и алгоритмы, способные обрабатывать немаркированные (неразмеченные) и несбалансированные наборы данных и работать при изменяющихся эксплуатационных факторах и переменной нагрузке в меняющейся среде.

В связи с тем, что в реальной промышленной среде в качестве начальных знаний доступен только нормальный (неповрежденный) класс оборудования (поскольку сигналы, полученные на работающем оборудовании на начальной

стадии эксплуатации еще не содержат в себе режимов при наличии неисправностей), необходимо адаптировать подходы и развивать направление применения средств ИИ и машинного обучения и искать алгоритмы, способные: 1. дать знания о самом дефекте – признаках его проявления, уровне развития; 2. быть устойчивыми к изменению режимов работы электромеханического оборудования и наличию комбинаций нескольких дефектов. Крайне важно извлекать из необработанных сигналов некоторые характеристики, именованные признаки, которые должны быть релевантными и не повторяющимися. Актуальность признака связана с его способностью различать как виды состояния анализируемой системы, так и отслеживать изменения. Способы обнаружения новых состояний традиционно рассматриваются как задача классификации, при которой обнаружение нового состояния системы в целом отличается от обнаруженных классов ранее, сформированных на основе начальных данных. Кроме того, по мере обнаружения нового состояния формируются и впоследствии распознаются новые классы. В этих случаях состояние считается новым, когда оно отличается от всех известных классов, и тогда проблема заключается в распознавании новинок и отнесении известных наблюдений к одному из существующих классов.

2.3 Методы диагностики асинхронного двигателя по сигналам тока

В нефтегазовой промышленности доступ к оборудованию ограничен, например, к погружным насосам; также в ряде случаев существуют дополнительные паразитные вибрации, искажающие результаты анализа, например, при диагностике установок бурения. В этих случаях практически невозможно использовать вибрационные методы диагностирования АД. В связи с относительно высокой стоимостью вибродиагностического оборудования и сложностью установки вибродатчиков, эти методы трудно применять для массовой диагностики оборудования в условиях нефтегазового комплекса, где используется большое количество электрических двигателей средней и малой мощности. Поэтому для решения этой задачи появились методы на основе анализа электрических сигналов АД, которые можно достаточно просто измерить и контролировать в рабочем режиме.

Для диагностики двигателей широкую популярность приобретают методы, которые не требуют остановки процесса и пригодны для обнаружения повреждений на стадии их зарождения. Методы, основанные на анализе электрических параметров, не требуют вывода оборудования из работы, а также позволяют расположить датчики в питающем узле нагрузки, исключая тем самым необходимость доступа к оборудованию.

Положительно зарекомендовали себя методы на основе анализа электрических координат (тока, напряжения, потокосцепления, мощности), включающие анализ среднеквадратических значений [128] и огибающих [120], спектральный анализ с применением различных оконных функций, вейвлет преобразования [77, 88] и анализ годографов обобщенных векторов [107, 132]. Относительно других контролируемых параметров (температура, шум, вибрации и др.) средства токовой диагностики обладают следующими преимуществами:

- не требуют непосредственного доступа к электромеханическому оборудованию;
- не требуют дополнительной доработки и модернизации диагностируемого оборудования для установки датчиков;
- обладают широким потенциалом в количестве диагностируемых электрических и механических узлов [3, 43].

Наряду с преимуществами остаются не решенными задачи определения вида дефекта, установления его уровня и локализации места возникновения с оценкой влияния на параметры привода.

Для выявления неисправностей на основе анализа тока часто применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ) и последующий анализ частотного спектра. Недостатками данного метода является чувствительность к ряду факторов и необходимость дополнительной информации. Например, если механическая нагрузка двигателя изменяется со временем, то при спектральном анализе тока статора следует учитывать то, что появление одних и тех же частотных составляющих может быть вызвано разными причинами. Также при разложении исходной функции с помощью БПФ на элементарные составляющие происходит

разложение на гармонические колебания с разными частотами, что исключает возможность обнаружения и отслеживания обобщенного сигнала, обусловленного дефектом и его развитием при разной нагрузке.

Асинхронные двигатели получили широкое распространение в промышленности в разных условиях их применения, в том числе в условиях, сильно изменяющихся во времени нагрузок. В частности, медленно текущие нестационарные процессы характерны для насосных и компрессорных систем. Переменные нагрузки обуславливают появление дополнительных составляющих в спектре тока АД, которые могут маскировать признаки, связанные с неисправностями самого двигателя. Вследствие этого при анализе спектра тока двигателя затруднительно обнаружить и разделить признаки, связанные с реальными неисправностями и признаки изменений нагрузки двигателя. В ряде случаев для использования метода диагностики на основе БПФ сначала получают эталонный спектр, соответствующий отсутствию повреждений двигателя; при появлении новых составляющих в спектре судят о наличии той или иной неисправности. Данный подход имеет ограничения ввиду отсутствия эталонного спектра на реальном действующем производстве.

2.4 Сравнительный анализ методов разложения сигналов тока

Для формирования общего подхода к идентификации различного вида дефектов необходимо перейти к обобщенной задаче исследования и разложения временных рядов [80], где под временным рядом принимается и исследуется зависимость изменения мгновенных значений тока в фазах от времени. Цель любого метода декомпозиции сигналов для обнаружения повреждения АД состоит в том, чтобы выделить из исходного сигнала тока статора и экстраполировать составляющую сигнала, соответствующую дефекту. При этом необходимо быстро и эффективно «разбить» сложный сигнал на более простые, но похожие компоненты. Необходимым условием является то, что комбинация всех этих компонент может восстановить исходный сигнал без потерь переносимой информации.

Таким образом, компонента X_i – это составляющая часть сигнала тока статора АД, представленного функцией времени $I_a(t)$, A , полученная в результате декомпозиции сигнала любым доступным математическим методом исследования временных рядов. Сумма полученных компонент восстанавливает исходный сигнал без потерь переносимой информации и удовлетворяет условию $I_a(t) = \sum_i X_i$.

По результатам разделения можно удалить содержание очень низких или очень высоких частот, не связанных с фактическими свойствами исследуемой структуры или режимами. Однако процесс шумоподавления и удаления мод связан с удалением нестационарных компонент, что может привести к отсутствию информации о начальных стадиях развивающихся дефектов. Составляющие, не реагирующие на повреждения и/или определяемые другими внешними факторами (например, температурой, сезонными изменениями и вибрациями, вызванными работающими механизмами), также могут быть удалены. При выделении независимых от времени особенностей, можно также отбросить нестационарные компоненты. В ходе исследований сигнала можно обнаружить более высокую чувствительность отдельных компонент к повреждениям, тогда область поиска полезной информации о состоянии АД смещается от всего сигнала к конкретной компоненте.

Для структурно неустойчивых систем рекомендуется использовать методы, которые работают на переменных временных интервалах, позволяющих характеризовать систему, как квазистационарную и соответствующую некоторому вектору текущих собственных динамических свойств [32].

Проведенное сравнительное исследование различных способов разложения представлено в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сравнительный анализ распространенных методов обработки сигналов АД (на основании таблицы 2.2)

	Смешивание мод	Влияние параметров способов на результат	Возможная потеря частоты мод	Возможная потеря амплитуды мод	Образование ложных экстремумов и смещений мод	Вычислительная сложность	Устойчивость к переходным процессам	Устойчивость к дискретизации и шуму	Выделение аperiodических и осциллирующих мод	Возможность выделения трендов	Необходимость знания количества мод при разделении
FFT	да	↑	нет	нет	нет	↓	↓	↓	нет	нет	нет
EMD	да		да	да	да				да	да	да
VMD	да	↓	да	да	нет	↑			да	да	да
HHT	да		да	да	да				да	да	нет
WT	нет		нет	да	нет		↑		да	да	нет
LMD	да		да	да	да				да	да	да
SVD	нет		нет	нет	да			↑	да	да	нет
Цветовая маркировка					Высокий (положительное заключение)						
					Низкий /простой (положительное заключение для столбцов 2/6)						
					Хороший / удовлетворительный						
					Средний						
					Низкий (отрицательное заключение)						
					Существенный / высокий (отрицательное заключение для столбцов 2/6)						

По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что часть методов в первую очередь подходит для анализа квази- и почти периодических сигналов. Однако при диагностике неисправностей оборудования мы часто сосредотачиваемся на обнаружении импульсов и переходных процессов. Более того, при изменяющихся во времени скоростях и условиях нагрузки токовые сигналы проявляют сильную нестационарность.

Качество ряда методов сильно зависит от примерного предположения о количестве мод в исходном сигнале. Многие методы декомпозиции не могут эффективно разделять близко расположенные частотные компоненты, что ведет к возможным потерям частот и амплитуд. Часть методов наиболее эффективны для анализа сигналов в постоянных рабочих условиях и неспособны давать приемлемые результаты разложения при сильно меняющихся во времени

мгновенных частот. Они также применимы к некоторым нестационарным случаям, когда условия движения изменяются монотонно и медленно.

На сегодняшний день опубликовано много работ по декомпозиции сигналов, исследования методов и их приложений продолжаются. Каждый год в различных областях сообщается о многих новых результатах исследований, касающихся как алгоритмов адаптивного режима декомпозиции, так и подходов к оценке мгновенной частоты.

В направлении методов исследования динамики процессов, обладающих сложной переменной структурой, в значительной степени зарекомендовал себя метод, основанный на сингулярном разложении исходной выборки (Singular Value Decomposition – SVD) [93, 95]. Этот подход довольно широко используется в задачах нахождения периодических зависимостей во временных рядах наблюдений, фильтрации шумов и сглаживания временных рядов, так как использование сингулярного разложения матрицы позволяет выделить наиболее значимые составляющие ряда и отсеять случайные возмущения [10, 156]. Также на основе проведенного критического сравнения (таблица 2.2) выявлено, что данный метод обладает рядом преимуществ при анализе составляющих сигналов тока.

В последние годы SVD нашел свое применение во многих отраслях, а также широко применяется в анализе сигналов механических систем. Так, в [112] предложен метод сингулярного разложения импульсной характеристики сигнала вибрации при исследовании дефектов подшипников, и количественно оценена связь между номером строки матрицы и шириной полосы подпространства; авторы получают последовательности коэффициента затухания двойного порядка для локализации ударов в сигнале. В работе [117] рассматривается усовершенствованный метод разложения по сингулярным числам с повторным взвешиванием (IRSVD) для анализа данных неисправного планетарного редуктора. В [149] предлагается SVD с измененным размером матрицы для анализа сигнала вибрации. Авторы, как и в [110], доказывают связь между количеством ненулевых сингулярных значений и частотами, содержащимися в исходном рассматриваемом сигнале. На этой основе метод апробирован на сигнале вибрации для выявления

несоосности. Если размерность матрицы более чем в два раза превышает количество частот, каждая частота генерирует только два ненулевых сингулярных значения, а для сигнала с несколькими частотами количество ненулевых сингулярных значений всегда в два раза больше, чем количество частот.

Другие модификации SVD – адаптивное разложение (ASVD) и разложение с повторным взвешиванием (RSVD) представлены в работах [76] и [113] соответственно применительно к исследованию дефектов подшипников. Однако все приведенные исследования направлены на анализ сигналов вибрации, что определяет актуальность исследования применения данного способа для сигналов тока в различных режимах при наличии дефектов и изменяющейся нагрузки на валу АД.

2.5 Способ раннего обнаружения наличия дефекта АД на основе сингулярного разложения

2.5.1. Математическое описание сингулярного спектрального анализа

На основе проведенного анализа (разделы 2.2-2.4) предлагается применение алгоритма для обнаружения неисправностей асинхронного двигателя [40, 156]. Ядром алгоритма обнаружения дефекта является метод обработки сигналов тока статора на основе сингулярного разложения (Singular Spectrum Analysis, SSA). Аппарат сингулярного анализа основан на разложении временного ряда на простейшие аддитивные составляющие, что позволяет учесть и исследовать его структуру [32, 127]

Метод сингулярного анализа состоит из двух основных этапов – декомпозиции и реконструкции, включающих по два шага (рисунок 2.6).

- преобразование одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры;
- исследование полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (SVD);
- процедуры группировки;

– и восстановлении исходного ряда по выбранным компонентам методом диагонального усреднения.

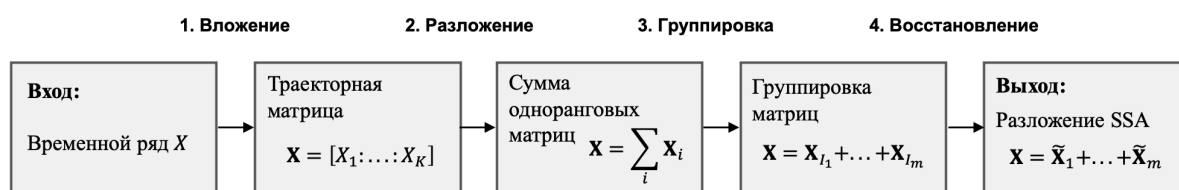


Рисунок 2.6 – Этапы выполнения сингулярного спектрального анализа [94]

Результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: тренды, периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты. Полученные в результате разложения компоненты и их изменения сопоставляются с режимом работы и уровнем исследуемого дефекта. Выявление необходимых компонент может служить основой прогнозирования как самого временного ряда, так и его отдельных составляющих при развитии дефекта и достижении предельных значений. При этом, метод не требует стационарности ряда, знания тренда, а также знания о наличии в ряде гармонических и циклических составляющих.

Вложение (построение траекторной матрицы)

Сигналы тока фаз АД, записанные в файл при определенном режиме нагрузки при наличии дефекта преобразовывались в вектор X , представляющий собой упорядоченный набор N мгновенных значений тока. Затем осуществляется процедура вложения, которая представляет из себя преобразование исходного одномерного ряда $X = [x_1, \dots, x_N]$ длины N в последовательность L -мерных векторов, число которых равно $K = N - L + 1$; L – длина окна, $1 < L < N$ (2.2):

$$X_i = (x_{i-1}, \dots, x_{i+L-1})^T, 1 \leq i \leq K. \quad (2.2)$$

Данные векторы образуют траекторную матрицу $\mathbf{X} = [X_1: \dots: X_K]$ исходного временного ряда, которая является Ганкелевой и имеет одинаковые элементы x_{ij} на диагонали $i + j = const$ (2.3):

$$\mathbf{X} = [X_1 : \dots : X_K] = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \dots & x_N \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Разложение (Singular value decomposition)

Сингулярным разложением для матрицы $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ является разложение следующего вида (рисунок 2.7) (2.4):

$$A = U \Sigma V^T, \quad (2.4)$$

где $U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – унитарная матрица левых сингулярных векторов;

$V = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – унитарная матрица правых сингулярных векторов;

Σ – диагональная матрица размером $m \times n$, диагональные элементы которой – неотрицательные значения сингулярных чисел матрицы A в порядке убывания, $\Sigma = [\text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_m), 0] \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_m > 0$ [96, 144].

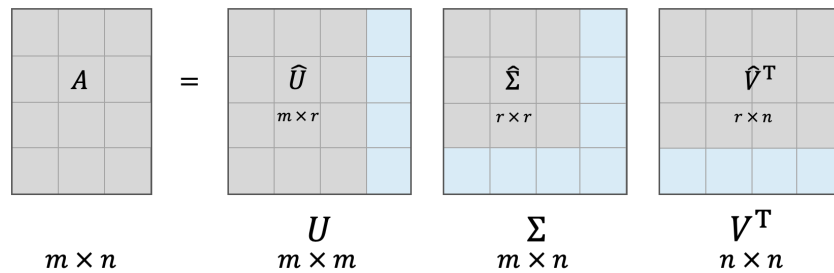


Рисунок 2.7 – Схематическое изображение SVD

Матрица A также может быть представлена в виде суммы подматриц (2.5):

$$A = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ u_1 & u_2 & \dots & u_r \\ | & | & \dots & | \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_r \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} - & v_1^T & - \\ - & v_2^T & - \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ - & v_r^T & - \end{bmatrix} = \quad (2.5)$$

$$= \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_m u_m v_m^T = \sum_{i=1}^r A_i,$$

где $r = \min(m, n)$ – ранг матрицы A ; соответственно, $A_i = \sigma_i u_i v_i^T$, ($i = 1, 2, \dots, r$) – подматрица i -го подсигнала.

Для разложения полученной на предыдущем шаге траекторной матрицы \mathbf{X} рассмотрим матрицу $S = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$, собственные числа которой $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ неотрицательны и взяты в порядке убывания. Обозначим $d = \text{rank } \mathbf{X} = \max\{j : \lambda_j > 0\}$, U_1, \dots, U_L – соответствующие собственные векторы матрицы S , $V_j = \mathbf{X}^T U_j / \sqrt{\lambda_j}$, $j = 1, \dots, d$ – факторные векторы.

Тогда разложение траекторной матрицы может быть записано следующим образом (2.6):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \dots + \mathbf{X}_d, \quad \mathbf{X}_j = \sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T, \quad (2.6)$$

где $(\sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T)$ – j -ая собственная тройка сингулярного разложения, содержащая сингулярное значение $\sigma_j = \sqrt{\lambda_j}$, левый сингулярный вектор U_j и правый сингулярный вектор V_j траекторной матрицы \mathbf{X} .

В результате применения метода SVD, мы получим (2.7):

$$\mathbf{X} = \sum_i \mathbf{X}_i, \quad \mathbf{X}_i = \sigma_i U_i V_i^T. \quad (2.7)$$

Для того, чтобы предварительно оценить структуру компонент, необходима визуализация разложенной траекторной матрицы на составляющие.

Группировка компонент

Данный шаг строится на основании формулы (2.6). Пусть $I = \{i_1, \dots, i_p\} \subset \{1, \dots, d\}$, тогда результирующая матрица \mathbf{X}_I , соответствующая группе I определяется как $\mathbf{X}_I = \mathbf{X}_{i_1} + \dots + \mathbf{X}_{i_p}$. Процедура группировки разбивает все множество индексов $\{1, \dots, d\}$ на m непересекающихся подмножеств I_1, \dots, I_m . Тогда разложение (2.8) может быть записано в виде:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{I_1} + \dots + \mathbf{X}_{I_m}. \quad (2.8)$$

Процедура выбора подмножеств I_1, \dots, I_m является процедурой группировки собственных троек.

В данном исследовании рассматривается несколько подходов к группировке: группировка на основе визуальной оценки о схожести структуры матриц

компонент, метод, основанный на двумерных диаграммах рассеяния и группировка на основе матрицы W-корреляции.

Реконструкция исходного сигнала

На заключительном этапе алгоритма каждая из матриц \mathbf{X}_{I_m} из разложенных (формула 2.8) преобразуется обратно в форму исходного объекта X . Эта операция осуществляется с помощью ганкелизации матриц (диагонального усреднения). В данной процедуре мы сталкиваемся с эндоморфизмом $\mathcal{M}_{K,L}(\mathbb{R})$, то есть имея на входе матрицу, на выходе получим ближайшую матрицу относительно нормы Фробениуса, которая соблюдает свойства Ганкелевой матрицы и сохраняет размер.

Пусть $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{L \times K}$, $1 \leq i \leq L$, $1 \leq j \leq K$. Обычно $L < K$, но для общности примем $L^* = \min(L, K)$, $K^* = \max(L, K)$ и $N = L + K - 1$. Пусть $y^*_{ij} = y_{ij}$ при $L < K$ и $y^*_{ij} = y_{ji}$ в остальных случаях. Пусть $s = i + j$, тогда формула диагонального усреднения для матрицы \mathbf{Y} примет вид (2.9):

$$\tilde{y}_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{s-1} \sum_{l=1}^{s-1} y^*_{l,s-l} & 2 \leq s \leq L^*, \\ \frac{1}{L^*} \sum_{l=1}^{L^*} y^*_{l,s-l} & L^* \leq s \leq K^* + 1, \\ \frac{1}{N-s+2} \sum_{l=s-K^*}^{L^*} y^*_{l,s-l} & K^* + 2 \leq s \leq N + 1. \end{cases} \quad (2.9)$$

Диагональное усреднение, примененное к каждой результирующей матрице компонент, создает восстановленные временные ряды. Таким образом, исходный ряд раскладывается в сумму восстановленных рядов, $\tilde{X} = [\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N]$.

2.5.2. Оценка вкладов и группировка

Оценка относительного вклада компонент в траекторную матрицу, а также кумулятивный вклад рассчитываются по выражениям (2.10):

$$RC_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{k=0}^{d-1} \sigma_k^2}, \quad \sum_{i=0}^i RC_i = \frac{\sum_{j=0}^i \sigma_j^2}{\sum_{j=0}^{d-1} \sigma_k^2}. \quad (2.10)$$

Определение количества информативных составляющих возможно по матрицам сходства главных компонент, рассчитанных на основе расстояния между парами ганкелевых матриц (2.11):

$$\|\mathbf{X}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K |x_{ij}|^2}, \quad (2.11)$$

где $\|\mathbf{X}\|_F$ – норма Фробениуса. Анализируя матрицу расстояний (рисунок 2.8), можно выделить четкую границу в диапазоне $\tilde{F}_{ij} = [10..20]$, что подтверждает сходство первых компонент и отбрасывает неинформативные компоненты $\tilde{F}_{ij} = [20..350]$ [156].

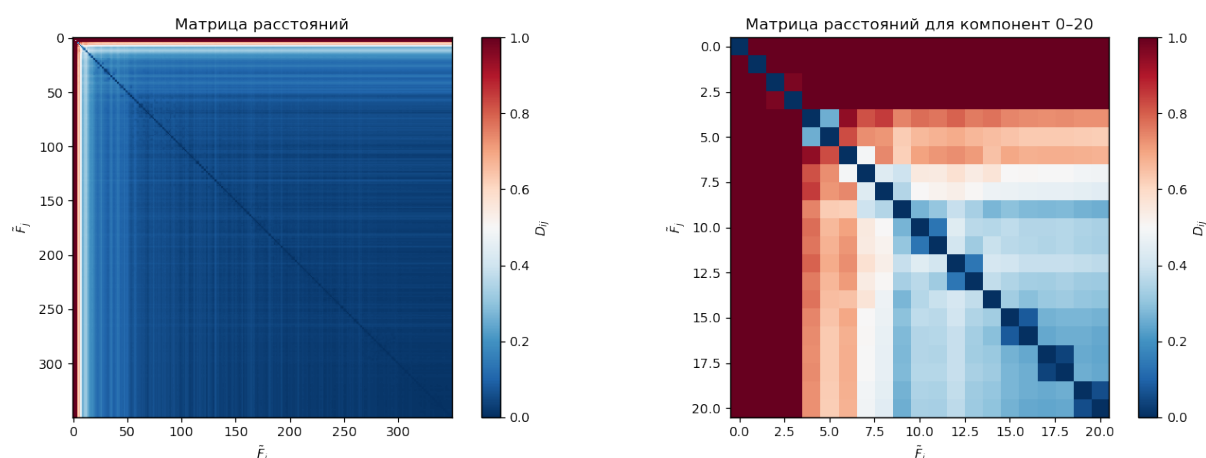


Рисунок 2.8 – Определение границы анализируемых компонент по матрице расстояний

Для проверки гипотез группировки компонент на основе визуального сравнения траекторных матриц в работе рассматривают двумерные диаграммы рассеяния (скатерограммы) и группировка на основе матрицы W-корреляции.

Двумерные скатерограммы представляют собой попарное изображение собственных векторов V_i и V_{i+1} в целях нахождения пар собственных векторов, соответствующих одной гармонике. Свойство ортогональности собственных векторов позволяет идентифицировать гармонику как изображение замкнутой кривой правильной формы (представлено в разделе 3.2.1., рисунок 3.16).

Матрица W-корреляции предназначена для проверки и количественного отражения степени делимости между элементарными компонентами. Анализ корреляционной матрицы позволяет определить пары коррелирующих компонент и сгруппировать их. Тогда мера делимости между двумя восстановленными временными рядами \tilde{F}_i и \tilde{F}_j будет определяться следующим образом (2.12):

$$W_{ij} = \frac{(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w}{\|\tilde{F}_i\|_w \|\tilde{F}_j\|_w}, \quad (2.12)$$

где $(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w$ – взвешенное внутреннее (скалярное) произведение, $(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w = \sum_{k=0}^{N-1} w_k \tilde{f}_{i,k} \tilde{f}_{j,k}$; $\tilde{f}_{i,k}, \tilde{f}_{j,k}$ – k -е значения \tilde{F}_i и \tilde{F}_j соответственно; $w_k = \min\{k, L, N - k + 1\}$; $\|\tilde{F}_k\|_w = \sqrt{(\tilde{F}_k, \tilde{F}_k)_w}$ для $k = i, j$. Чем меньше значение W_{ij} , тем выше разделимость компонент; соответственно, если восстановленные \tilde{F}_i и \tilde{F}_j близки друг к другу, то $(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w \rightarrow \|\tilde{F}_i\|_w \|\tilde{F}_j\|_w$, а $W_{ij} \rightarrow 1$. $W_{ij} = 0$, если \tilde{F}_i и \tilde{F}_j ортогональны. Данная зависимость (мера) необходима для расчета несходства при выполнении иерархической кластеризации для автоматической группировки компонент: $d(i, j) = 1 - |W_{ij}|$. Визуализация и описание метода на основе иерархической кластеризации представлены в разделе 3.2.1., рисунок 3.17.

2.5.3. Обоснование выбора длины окна

Два наиболее важных параметра SSA – это длина окна L и способ группировки [93]. Строгих рекомендаций по их выбору не существует. Более того, эти рекомендации отличаются для разных задач и разных предположений о структуре временного ряда. Если период периодической составляющей временного ряда известен, рекомендуется взять длину окна, кратную фундаментальному периоду [36]. В то же время, для извлечения сигналов из зашумленных временных рядов рекомендуется большая длина окна (оптимально, в диапазоне от $N/3$ до $N/2$, где N – длина временного ряда) [143]. В некоторых работах излагается, что наиболее детальное разложение ряда достигается при выборе длины окна, приблизительно равной половине длине ряда ($L \approx N/2$) [38]. Тем не менее, в трудах [92, 94] утверждается, что моделирование дает рекомендации: $L \approx 0,4N$. В ходе исследования определено [156], что в случае сигнала тока при длине $L \approx 0,35N$ достигаются более высокие показатели скорости расчета, при этом разброс результатов при вариации длины окна от 0,3 до 0,5

составлял не более 5%, разница во времени достигала до 2-3 раз. Поэтому для анализа полученных сигналов во всей работе используется длина окна $L \approx 0,35$.

2.5.4. Обоснование количества рассматриваемых компонент

Практические рекомендации относительно количества рассматриваемых компонент для анализа повреждения в литературе также отсутствуют. В качестве обоснования рассмотрения не более 12-ти компонент из всех полученных сингулярных значений, используемых при разложении, можно использовать количество видов возможных факторов, формирующих сигнал тока. К факторам, влияющим на сигнал тока, помимо конструктивных особенностей двигателя и нагрузки, можно отнести наличие дефектов. Следовательно, количество возможных дефектов является граничным для рассмотрения в качестве значимых компонент. К повреждениям, которые возможно определить по электрическим сигналам, относятся следующие: выход из строя подшипников, несоосность валов, межфазное замыкание, эксцентриситет, обрыв стержней ротора [156].

2.5.5. Визуализация работы SSA

Для исследования работы SSA применительно к току статора рассмотрим временной ряд синусоидальной функции без искажений и дополнительных компонент (рисунок 2.9) и его исследование методом SSA (таблица 2.6).

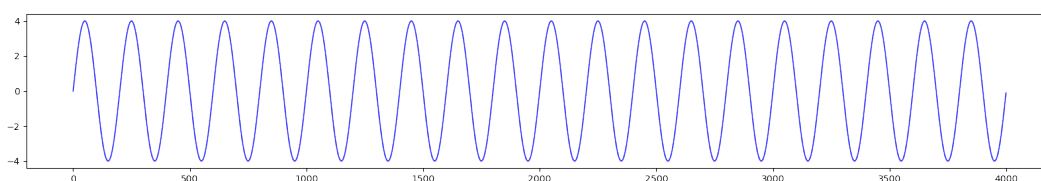
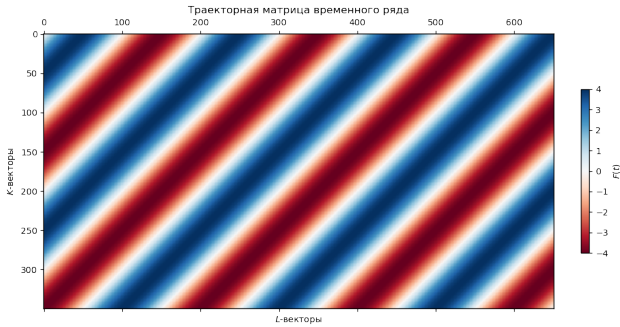
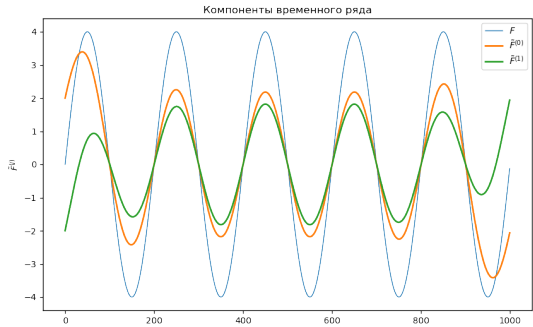
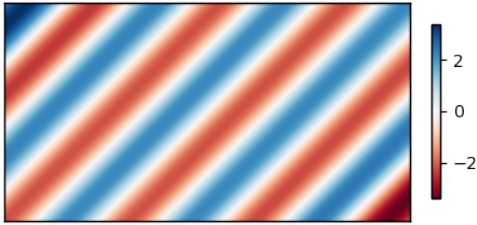
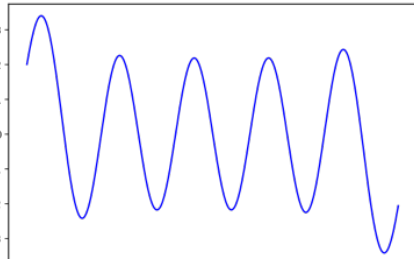
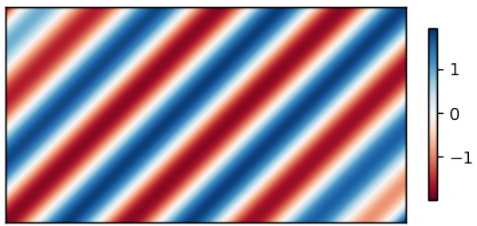
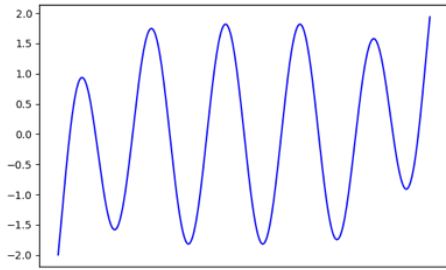


Рисунок 2.9 – Исследуемый временной ряд $X [I_a(t), A]$

Таблица 2.6 – Визуализация поэтапного выполнения сингулярного спектрального анализа

Этап 1: Построение траекторной матрицы временного ряда и ее разложение	Этап 2: Реконструкция сигнала и восстановление компонент
<p data-bbox="199 286 446 320">Шаг 1: Вложение</p> 	<p data-bbox="882 286 1165 320">Шаг 3: Группировка</p> 
<p data-bbox="199 701 470 734">Шаг 2: Разложение</p> 	<p data-bbox="882 701 1212 734">Шаг 4: Восстановление</p> 
	

Исходя из полученных результатов шагов 2-4, можно сделать вывод об особенности работы данного метода применительно к сигналу тока (синусу): по краям восстановленного сигнала возникают затухания и колебания, что является ошибкой аппроксимации. Поэтому появляется добавочное слагаемое для нивелирования ошибки восстановления, и таким образом, одному восстановленному сигналу соответствуют две компоненты, первая из которых (\tilde{X}_0) является достаточной для восстановления общей структуры сигнала, а вторая (\tilde{X}_1) – нивелирует ошибку аппроксимации.

Для демонстрации устойчивости выделения компонент при зашумленном сигнале применительно как к фазному, так и к обобщенному току статора, рассмотрим временной ряд синусоидальной функции с подмешиванием,

имитирующим проявление высокочастотной и низкочастотной составляющих: $i_2 = 0,025i$, $f_2 = 20f$, $i_3 = 0,0025i$, $f_3 = 0,5f$, где i – амплитуда исходного сигнала (рисунок 2.10), f = частота исходного сигнала.

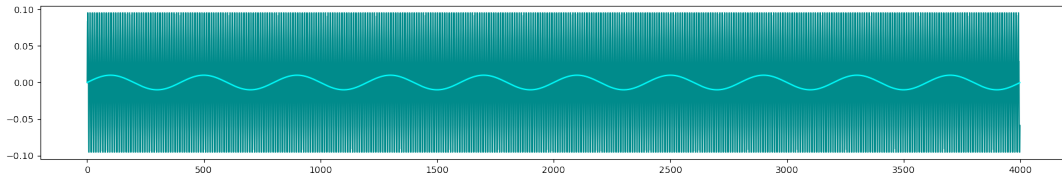


Рисунок 2.10 – Подмешиваемые сигналы: темный – $i_2 = 0,025i$, $f_2 = 20f$,
светлый – $i_3 = 0,0025i$, $f_3 = 0,5f$

Исследование обобщенного сигнала выполняется на основе преобразования Парка-Горева [75, 85, 115, 140]. Преобразование Парка-Горева осуществляет переход от трехфазной системы ABC к однофазной dq , что позволяет отслеживать траектории векторов (годографов) тока $I_S(t)$ и напряжения $U_S(t)$ вместо 6 фазных координат: $i_A(t), i_B(t), i_C(t), u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ [39] (2.13).

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d(t) = \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \right] \times i_A(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \times i_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{6}} \right] \times i_C(t) \\ i_q(t) = \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \times i_B(t) - \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] \times i_C(t) \\ I_S(t) = i_d(t) + j \times i_q(t) \\ M(t) = |I_S(t)| = \sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2}, \end{array} \right. \quad (2.13)$$

где i_d, i_q , – проекции обобщенного вектора тока $I_S(t)$ асинхронного двигателя в двухфазной вращающейся системе координат-dq;

$i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ – мгновенные значения фазных токов статора АД.

Сопоставление двух подходов (рисунок 2.11) позволяет сделать следующий вывод: оба варианта демонстрируют свою эффективность в выделении компонент. Однако результаты подхода с фазным током более очевидны при наличии искажений в конкретной фазе, что в большей степени соответствует проявлению искажений электрического характера (межфазные и межобмоточные замыкания и др.).

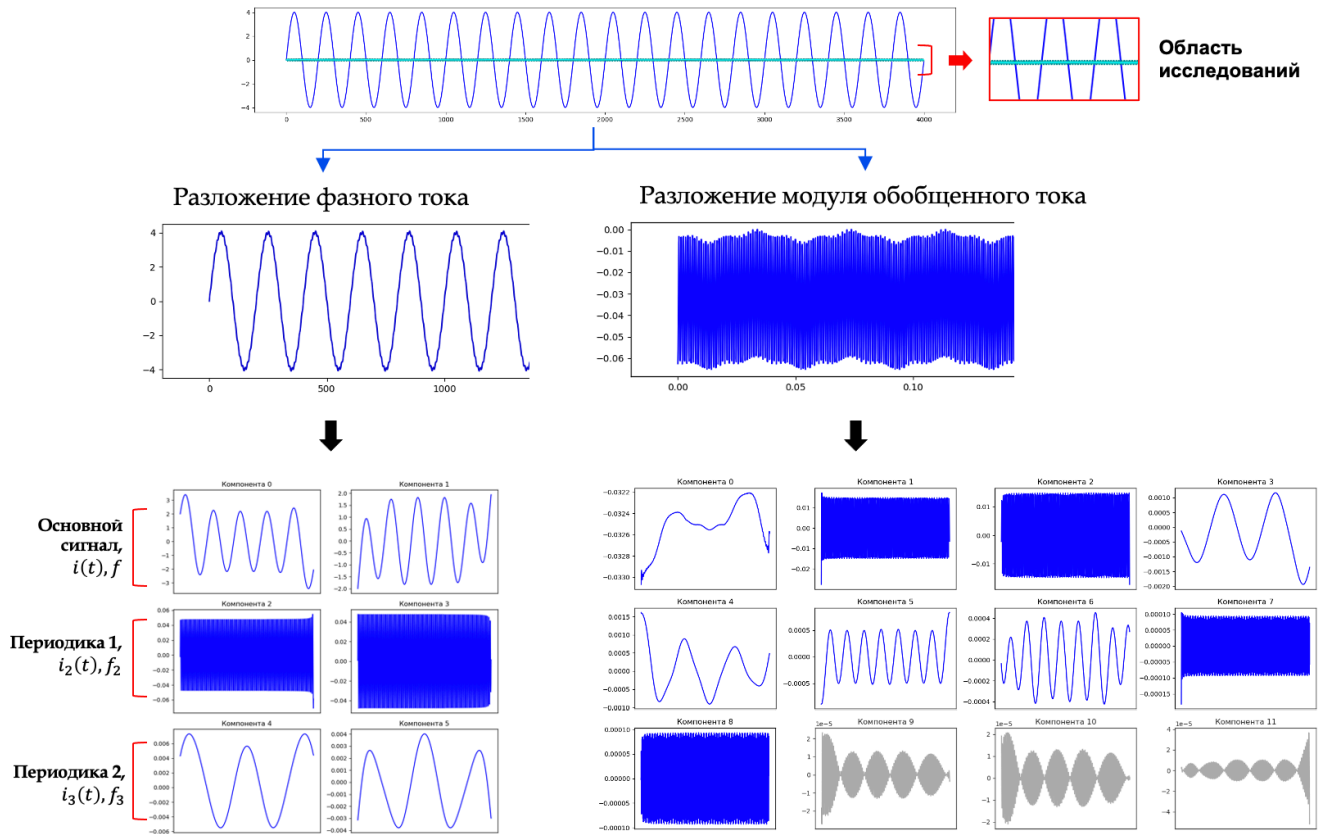


Рисунок 2.11 – Сравнение разложения сигнала с подмешиванием для двух подходов по фазному току (слева) и по модулю обобщенного тока (справа)

Обобщенный ток позволяет исключить основную гармонику и несимметричные составляющие, обусловленные искажениями, которые возникают при повреждениях в электрической части, что позволяет более устойчиво обнаруживать искажения, связанные с механическими повреждениями [31], однако сигнал модуля обобщенного тока является более высокочастотным, что может вызвать потерю устойчивости к разложению сигнала. Границы допустимой дискретности данных в этом случае должны быть исследованы дополнительно. Тем не менее, метод позволяет рассматривать восстановленные компоненты укрупненно по объемам групп или категории – данный подход будет рассмотрен в главе 3.

Учитывая особенности разложения мгновенных токов каждой фазы и разложения обобщенного тока, следует использовать преимущества обоих методов для обнаружения возникновения компонент и их последующей классификации.

Разложение следует выполнять параллельно обоими способами и в последствии проводить обобщение и сопоставление полученных компонент.

Таким образом, был сформулирован алгоритм (рисунок 2.12) выполнения процедуры сингулярного спектрального анализа применительно к сигналу тока статора [40, Приложение Д], здесь необходимо отметить, что узел выполнения группировки компонент может быть вариативен и базироваться на целом ряде подходов; на вход алгоритма мы можем подавать как сигнатуры фаз по отдельности, так и модуль обобщенного тока. На выходе алгоритма ключевыми характеристиками работы являются сами компоненты и оценка их уровня вклада в исходный сигнал.

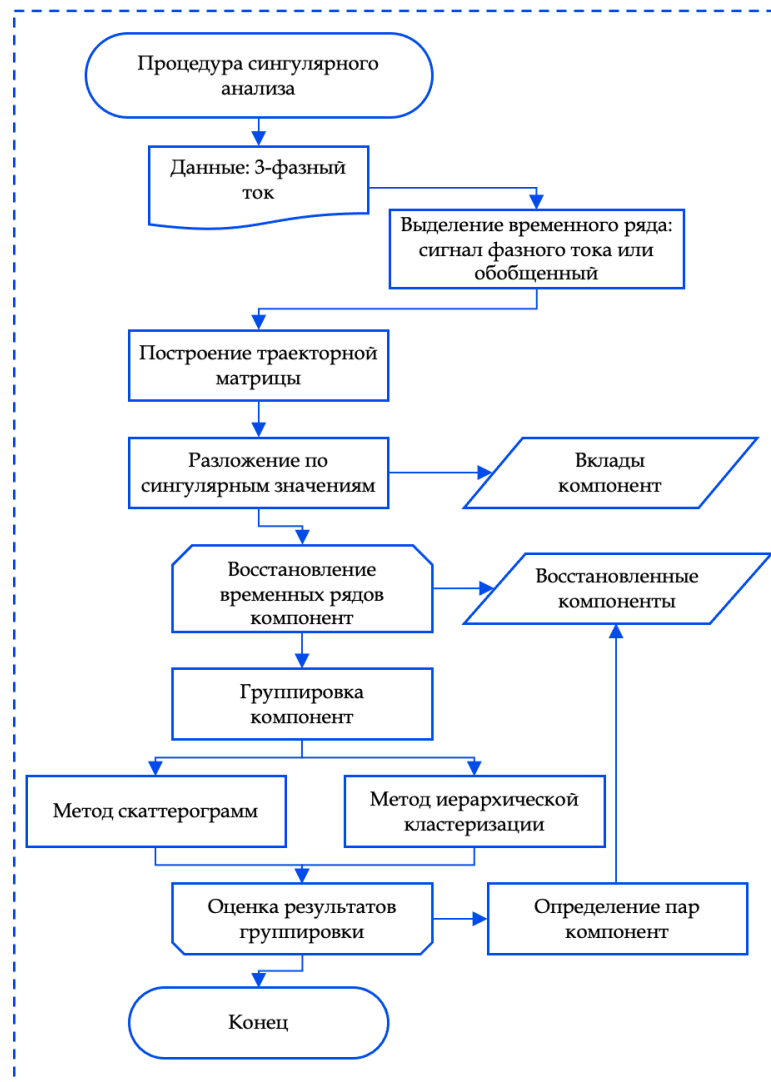


Рисунок 2.12 – Алгоритм выполнения процедуры сингулярного спектрального анализа применительно к сигналу тока статора

2.6 Выводы по главе 2

1. На основе проведенного имитационного моделирования системы неуправляемого электропривода на базе асинхронного двигателя установлено, что при вариации величины сопротивления изоляции обмотки статора относительно корпуса электродвигателя потребляемая электрическая мощность при номинальной нагрузке увеличивается на 8% , а при максимальной – на 4,3%, что не приводит к срабатыванию тепловой защиты, но снижает общий КПД на всем периоде существования повреждения до момента его устранения или перехода в междуфазное короткое замыкание.

2. По результатам теоретического анализа установлено, что существующие методы диагностики, основанные на сигналах вибрации и тока, не позволяют определить весь комплекс дефектов и отслеживать уровень их изменений при вариации режимов работы АД, а также использовать результаты анализа для оценки влияния дефектов на эффективность эксплуатации АД.

3. На основе обзора методов диагностики и средств обработки данных установлено, что перспективными являются средства машинного обучения, комбинация классических методов и подходов к глубокому обучению, которые позволяют автоматически извлекать признаки неисправностей из сигналов. В качестве наиболее распространенных сигналов для диагностики данными методами используются мгновенные значения вибрации, тока и напряжения.

4. По результатам теоретических исследований и сравнительного анализа выбран метод декомпозиции сигнала, основанный на математическом аппарате сингулярного спектрального анализа, на основе которого разработан алгоритм выполнения процедуры сингулярного спектрального анализа применительно к сигналам тока фаз статора АД и модуля обобщенного тока, учитывающий различные методы группировки компонент и определение их вклада. Группировка и категоризация компонент позволят оценивать кумулятивный вклад, производимый дефектами, что повышает достоверность обнаружения повреждения.

ГЛАВА 3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ АД НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТОКА СТАТОРА

3.1 Описание лабораторного стенда и экспериментальных исследований алгоритма раннего обнаружения дефектов АД

С целью апробации предложенного метода на базе Образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета создана экспериментальная установка, на которой проводились лабораторные испытания и сбор сигналов тока для последующего анализа. Для проведения исследований и подтверждения гипотез о возможности раннего обнаружения дефектов механической природы реализована регистрация мгновенных значений фазных токов и напряжений на вводах электродвигателя до 600 000 точек / 60 секунд, что составляет частоту дискретизации $f_d = 10000$ Гц.

3.1.1. Лабораторный стенд

Для исследования обнаружения дефекта подшипника использовался асинхронный двигатель АИР132М4, $P_{ном} = 11$ кВт, с питанием от сети частотой 50 Гц в непрерывном режиме работы и постоянной нагрузкой на валу в процессе эксперимента.

Для исследования дефектов типа «несоосность» и «ослабление механических креплений» используется асинхронный двигатель АИР80В4 (таблица 3.1). Питание АД осуществляется от синусоидального напряжения с частотой сети 50 Гц. Вид и уровень нагрузки формируется за счет частотного регулирования ответным АД посредством полупроводникового преобразователя частоты (рисунок 3.1).

Таблица 3.1 – Паспортные данные асинхронного двигателя

Марка двигателя	$P_{ном}$, кВт	$I_{ном}$, А	n об/мин	$\cos \varphi$	η_d , %	λ	K_p	K_i
АИР132М4	11,00	23,40	1450	0,82	87,1	2,3	2,2	6,8
АИР80В4	1,5	3,6	1390	0,8	78,7	2,3	2,3	6,2

где $P_{ном}$ – номинальная мощность;

$I_{ном}$ – номинальный ток АД;

n – скорость вращения вала;

η_d – коэффициент полезного действия;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности, о.е.;

λ – перегрузочная способность, о.е.;

K_p – кратность пускового момента, о.е.;

K_i – кратность пускового тока, о.е.

Электродвигатели АИР общепромышленного назначения – это наиболее востребованный в промышленности агрегат для привода насосов, компрессоров, вентиляторов, станков, мельниц, измельчителей и транспортных механизмов. Он обладает надежной конструкцией с хорошими пусковыми, вибрационными, акустическими характеристиками.

Схема подключения АИР132М4 показаны на рисунке 3.1. Постоянная нагрузка осуществляется с помощью электромагнитного тормоза. Сбор данных высокой частоты дискретизации реализован с помощью универсального шасси NI PXI-1042 и многофункционального модуля ввода-вывода PXI-6251.

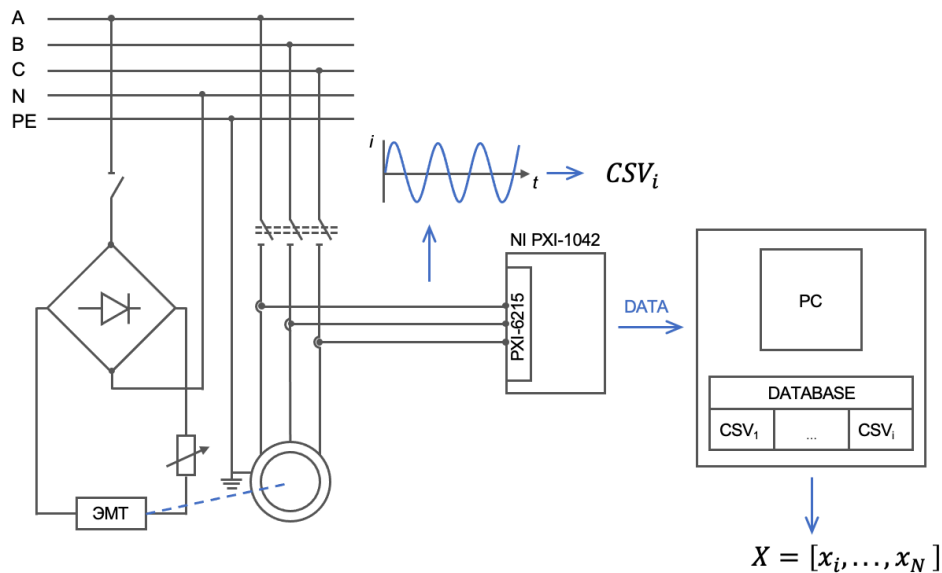


Рисунок 3.1 – Общая схема работы стенда включая алгоритм SSA

Работа второго стенда с АИР80В4 осуществляется следующим образом. Исследуемый АД (рисунок 3.2) и преобразователь частоты питаются (Altivar Process ATV950U22N4E) от бокса 3-х фазного синусоидального напряжения 380 В 50 Гц (рисунок 3.3). За счет регулирования нагрузочного двигателя (рисунок 3.2)

ступенчато формируется момент сопротивления на валу. Токоведущие кабели исследуемого двигателя охвачены датчиками тока (LA 25-NP/SP44) [52] и напряжения (LV 25-P/SP5) [51] на эффекте Холла компенсационного типа. Выходы датчиков через коннекторную плату подключены к высокочастотному АЦП (NI PXI-6251) многомодульного шасси (NI PXI-1042Q). Формирование базы данных осуществлялось на локальном сервере.



Рисунок 3.2 – Вид спарки исследуемого и нагрузочного АД с создаваемыми ослаблениями креплений

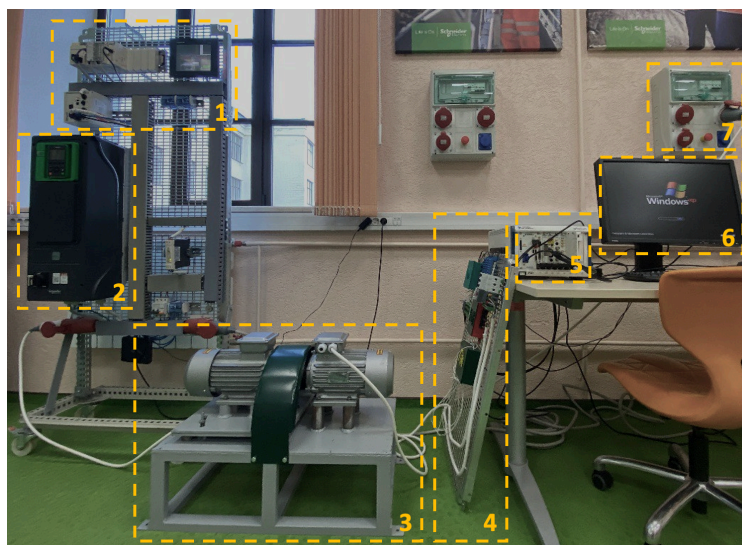


Рисунок 3.3 – Лабораторный стенд: 1-контроллер (Modicon M340); 2-преобразователь частоты (Altivar Process ATV950U22N4E); 3-спарка АД-АД; 4-схема измерения датчиков тока (LA 25-NP/SP44) и датчиков напряжения (LV 25-P/SP5); 5-шасси сбора данных (PXI-6052); 6-персональный компьютер; 7- ввод 380 В

3.1.2. Диагностируемые дефекты АД

Согласно ряду исследований отказ подшипника оказывает наиболее интенсивное искажение магнитного поля воздушного зазора АД, что проявляется в виде искажения синусоидального характера потребляемого тока статора.

Механические повреждения являются одними из наиболее часто встречаемых источников отказов электромеханического оборудования и составляют более 30% случаев [116], и одной из основных причин, приводящих к отказам, служит некачественная установка и монтаж – 12,9 % [126] (раздел 1.3.1).

К механическим причинам возникновения вибраций электродвигателей относится ослабление креплений, что в случае удаленного оборудования или при отсутствии персонала может быть своевременно не обнаружено, при этом уровень вибраций близок к шуму, и нормированные значения зачастую проявляются уже после длительного воздействия [6, 139]. Данный вид дефекта на начальном этапе слабо идентифицируем; приводит к ускоренному ослаблению резьбовых соединений основания механизма, что влечет постепенное разрушение фундамента и возникновение рисков останова. Также, как и прочие динамические вибрации, ослабление креплений провоцирует возникновение механических колебаний в других узлах, провоцируя ускоренное снижение энергетических характеристик АД [90].

Обнаружение ослабления креплений на ранней стадии развития позволит избежать дополнительных энергетических потерь и сократить эксплуатационные расходы [81], а в дальнейшем – реализовать переход к интеллектуальным алгоритмам, адаптирующимся под различные условия, для достижения эффективного управления ТООР [27].

3.1.3. Лабораторные исследования по обнаружению дефекта подшипника

Дефект подшипника был выбран как один из наиболее распространенных видов дефектов и классических примеров для рассмотрения работоспособности предлагаемого метода. Процедура эксперимента заключается в искусственном разрушении внутренних колец подшипника в виде ряда оболочек разрушения,

вызванных трением, в шарикоподшипнике с глубоким пазом. Поэтому было искусственно создано образование усталостных раковин. Необходимо отметить, что возникновение раковин в подшипниках не всегда обусловлено процессом усталостного разрушения материала, а также оно носит довольно длительный характер, не поддающийся обнаружению при анализе сигнала вибрации на ранних стадиях развития [165]. Из данных соображений градация развития дефекта подшипника определяется нормальным состоянием, одной раковиной (ранняя стадия) и тремя усталостными раковинами (также ранняя стадия с более видимым проявлением в сигнале).

Как показано на рисунке 3.4, износ подшипника происходит постепенно: инкубационный период от 50 до 60 млн оборотов; стадия начального развития разрушения – от 30 до 40 млн оборотов; ускоренная деградация – от 20 до 25 млн оборотов, при котором за относительно короткий срок повреждение существенно увеличивается и впоследствии происходит отказ [97].

Расчетный ресурс подшипника определяется как число оборотов (или рабочих часов) на определенной скорости, которые подшипник способен выдержать до первых признаков износа; в случае постоянной частоты вращения рассчитывается следующим образом (3.1):

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{n} \cdot L_{nm}, \quad (3.1)$$

где L_{nm} – ресурс подшипника при надежности 90% (для подшипников SKF – 100 – n^1), коэффициент n^1 равен разнице между требуемой надежностью и 100% или вероятностью отказа), млн об.;

n – частота вращения, об/мин;

L_{nmh} – ресурс подшипника при надежности 90% (для подшипников SKF – 100 – n^1), рабочие часы.

Надежность 90% предполагает, что в группе идентичных подшипников, работающих в одинаковых условиях, существует потенциал, что 10% не отработают расчетного ресурса. Однако на практике более половины всех подшипников превышают рассчитанный срок службы в 3-5 раз.

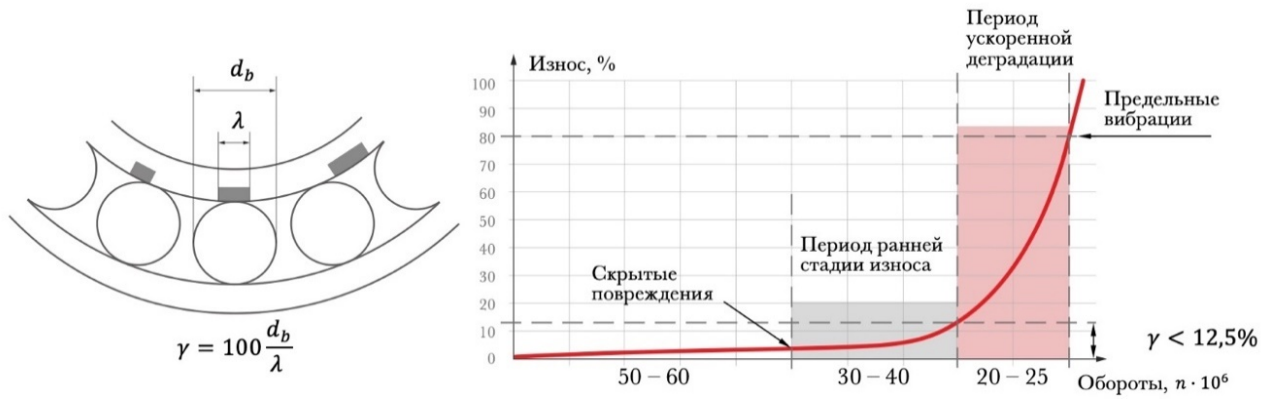


Рисунок 3.4 – Характеристики износа внутреннего кольца подшипника: а) – общий вид отношения трещины к телу качения; б) – стадии износа подшипника

Неисправные подшипники генерируют различные силы, вызывающие повышение амплитуды вибрации до 85% от номинальных [65]. Это приводит к увеличению потребления энергии, которая, по различным оценкам для насосных систем, может увеличиваться до 14%, при этом общий КПД снижается до 18% [124, 135]. Обнаружение разрушения подшипника считается ранним, когда диаметр трещины λ меньше 12,5% диаметра шарика подшипника d_b [57]. Поскольку деградация подшипника на ранней стадии очень низка, величина изменения диагностических параметров чрезвычайно мала и классическими средствами в условиях реального предприятия может не обнаруживаться. Наиболее распространенными причинами повреждения подшипников являются ошибки смазывания – 36%, монтажа – 16%, загрязнение смазки – 14% и усталостный износ – 34% [164].

В ходе работы выполнена деградация поверхности внутреннего кольца подшипника 6208 (рисунок 3.5, таблица 3.2) на заднем подшипниковом щите асинхронного двигателя в виде градиционных раковин. Для искусственной деградации сколы наносились при помощи гравировального станка: была полностью удалена смазка из подшипника, далее алмазной фрезой делались углубления в дорожке. После этого были удалены остатки стружки и загрязнений в ультразвуковой ванночке. Подшипник был заново смазан смазкой и установлен на вал электродвигателя. Условия, при которых регистрировались три набора мгновенных значений фазных токов и напряжений:

- Работа исправного двигателя в стандартных условиях при номинальной нагрузке; далее – «без дефектов» (без обнаруженных дефектов, $\gamma \leq 1\%$);
- Работа двигателя с одной раковинкой во внутреннем кольце подшипника при номинальной нагрузке; далее – «1 раковина» ($1 < \gamma \leq 12,5\%$);
- Работа двигателя с тремя раковинами во внутреннем кольце подшипника при номинальной нагрузке; далее – «3 раковины» ($12,5 < \gamma \leq 20\%$).

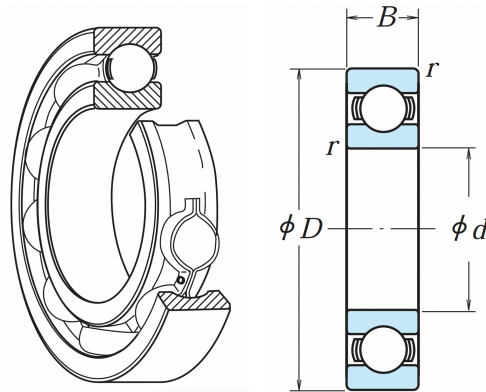


Рисунок 3.5 – Подшипник 6208 ZZ C3

Таблица 3.2 – Технические характеристики подшипника 6208 ZZ C3

d	D	B	r	C_r , Н	C_{0r} , Н	C_r , кгс	C_{0r} , кгс	f	N_{max} , об/мин (смазка)	N_{max} , об/мин (масло)
40	80	18	1,1	29 100	17 900	2 970	1 820	14	8 500	10 000

где D, d, B, r – размеры подшипника, мм;

C_r, C_{0r} – динамическая и статическая нагрузка;

f – Коэффициент, зависящий от геометрии подшипника;

N_{max} – предельные скорости при консистентной смазке и жидком масле, об/мин.

3.1.4. Лабораторные исследования по диагностике несоосности

Эксперимент для исследования возможности обнаружения дефекта типа «несоосность»: исследуемый АД с помощью платформы опускался на 3% и 6%, соответствующим одному и двум оборотам направляющего винта (схема на рисунок 3.6), с изменением нагрузки и оценкой эффективности обнаружения неисправности. Изменение нагрузки также производилось ступенчато с шагом 20% от номинального значения момента $M_{ном}$ до режима холостого хода.

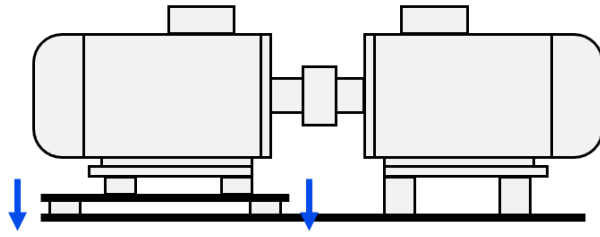


Рисунок 3.6 – Испытание на несоосность валов исследуемого и нагрузочного АД

Всего исследуется 3 набора данных, соответствующих трем состояниям машины:

- Нормальное состояние (работа исправного двигателя) в режиме холостого хода (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$;
- Работа двигателя при опускании платформы на XX% (далее – «Несоосность 1») в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$;
- Работа двигателя при опускании платформы на XX% (далее – «Несоосность 2») в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$;

3.1.5. Лабораторные исследования при ослаблении крепления

Программа следующего эксперимента заключалась в ослаблении креплений АД согласно схеме на рисунке 3.7 с изменением нагрузки и оценкой эффективности обнаружения неисправности. Изменение нагрузки производилось ступенчато с шагом 20% от номинального значения момента $M_{\text{НОМ}}$ до режима холостого хода.

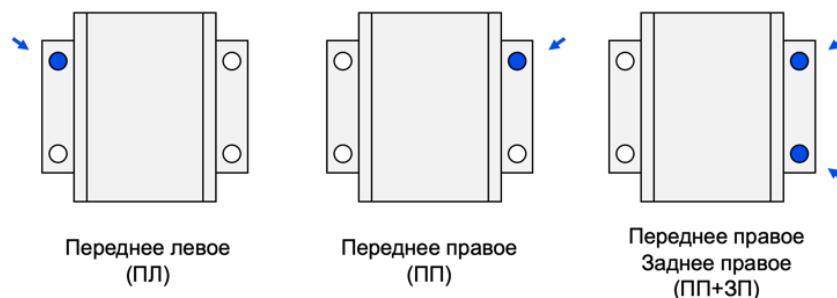


Рисунок 3.7 – Схема ослабления крепления АД вид сверху

Всего исследуется 4 набора данных, соответствующих четырем состояниям машины:

- Нормальное состояние (работа исправного двигателя) в режиме холостого хода (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$;
- Работа двигателя при ослаблении правого переднего крепления (далее – «ПП») в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$;
- Работа двигателя при ослаблении левого переднего крепления (далее – «ПЛ») в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$;
- Работа двигателя при ослаблении правого переднего и правого заднего креплений (далее – «ПП+ЗП») в режиме (Х.Х.), при нагрузке $0,01 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,4 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,6 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $0,8 \cdot M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$.

3.1.6. Обработка результатов

Обработка данных производилась с помощью языка программирования Python, для вычислений и применения SSA из каждой выборки временного ряда тока было выделено несколько отрезков, соответствующих длительности 0,4 сек. (4000 точек). Для исключения влияния основной гармоники и снижения влияния шумов, а также для интеграции данных измерений со всех трех фаз, проведен анализ модуля обобщенного вектора тока, полученного на основе преобразования Парка-Горева. Анализ спектра обобщенного тока классическими методами (БПФ) доказывает эффективность перед анализом спектра фазного тока при распознавании механических повреждений [31, 173].

При проведении экспериментов варьировалось значение нагрузки и уровень дефекта, по каждому режиму проводилось 4 эксперимента. Для оценки погрешности измерений проведена классическая оценка дисперсии воспроизводимости. Проведена проверка нулевой гипотезы о равенстве дисперсии во всех опытах на основе критерия Кохрена, которая показала, что воздействия

факторов нагрузки и уровня дефекта во всех экспериментах имеют одинаковый эффект, для оценки значимости различия дисперсий применялся критерий Фишера. По результатам проведенного статистического анализа установлено, что данные экспериментов принадлежат одной генеральной совокупности, подчиняющейся нормальному закону распределения, математические ожидания выборок равны друг другу, а дисперсия однородна.

В качестве примера на рисунках 3.8-3.11 приведены значения выборки данных экспериментов и парные дисперсии (для упрощения визуализации) для различных режимов.

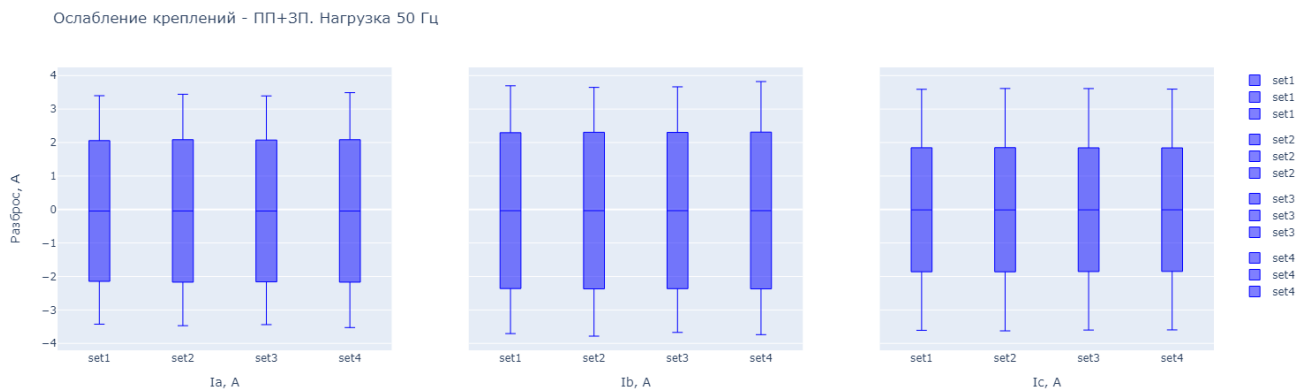


Рисунок 3.8 – Разброс данных мгновенных значений токов в фазах по результатам 4-х экспериментов при фиксированном режиме нагрузки (режим холостого хода) а также виде и уровне повреждения (ослабление переднего и заднего крепления с левой стороны)

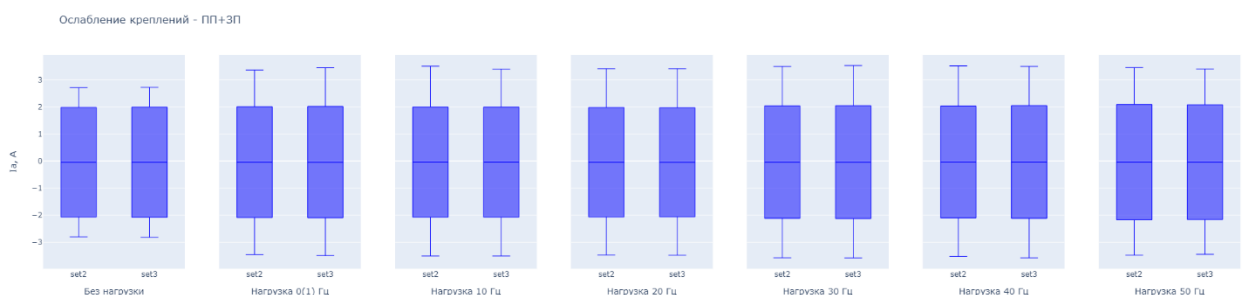


Рисунок 3.9 – Разброс данных мгновенных значений токов в одной фазе по результатам 2-х экспериментов при вариации режимов нагрузки и фиксированном уровне повреждения (ослабление переднего и заднего крепления с левой стороны)

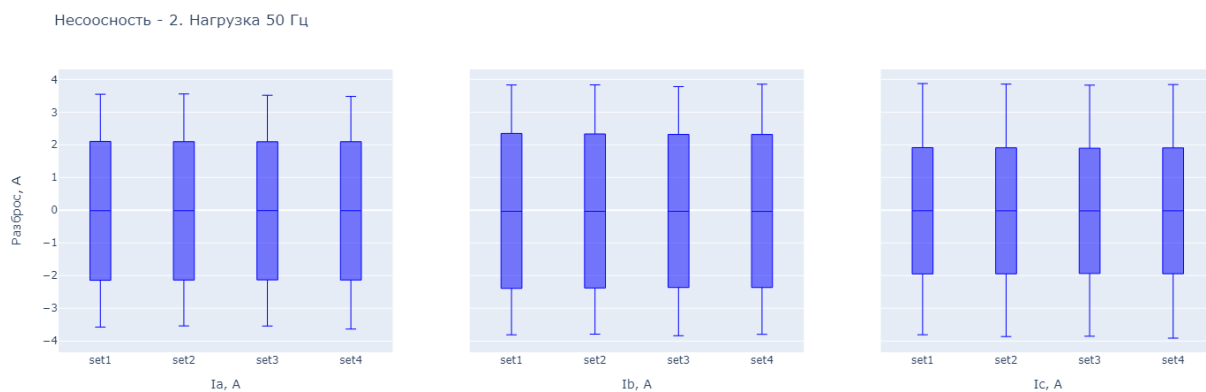


Рисунок 3.10 – Разброс данных мгновенных значений токов в фазах по результатам 4-х экспериментов при фиксированном режиме нагрузки (максимальная нагрузка), а также виде и уровне повреждения (несоосность)

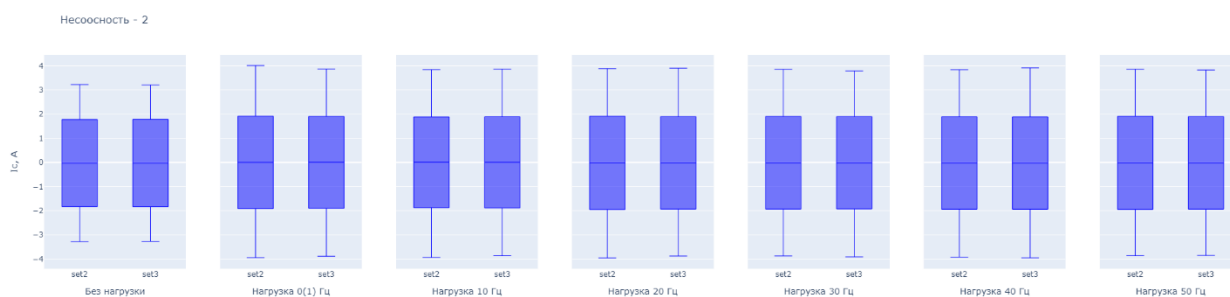


Рисунок 3.11 – Разброс данных мгновенных значений токов в одной фазе по результатам 2-х экспериментов при вариации режимов нагрузки и фиксированном уровне повреждения (несоосность)

3.2 Исследование дефектов подшипника методом сингулярного разложения тока фаз статора АД

3.2.1. Исследование образования раковин в подшипниках методом сингулярного спектрального анализа по фазам тока АД

По результатам экспериментов получены три временных ряда питающего напряжения и потребляемого тока АД: первый набор данных – без дефектов, два набора имеют 1 или 3 дефекта одного типа соответственно. Данные временные ряды имеют одинаковую синусоидную структуру, однако присутствуют незначительные искажения, природа которых визуально неопределима (рисунок 3.12).

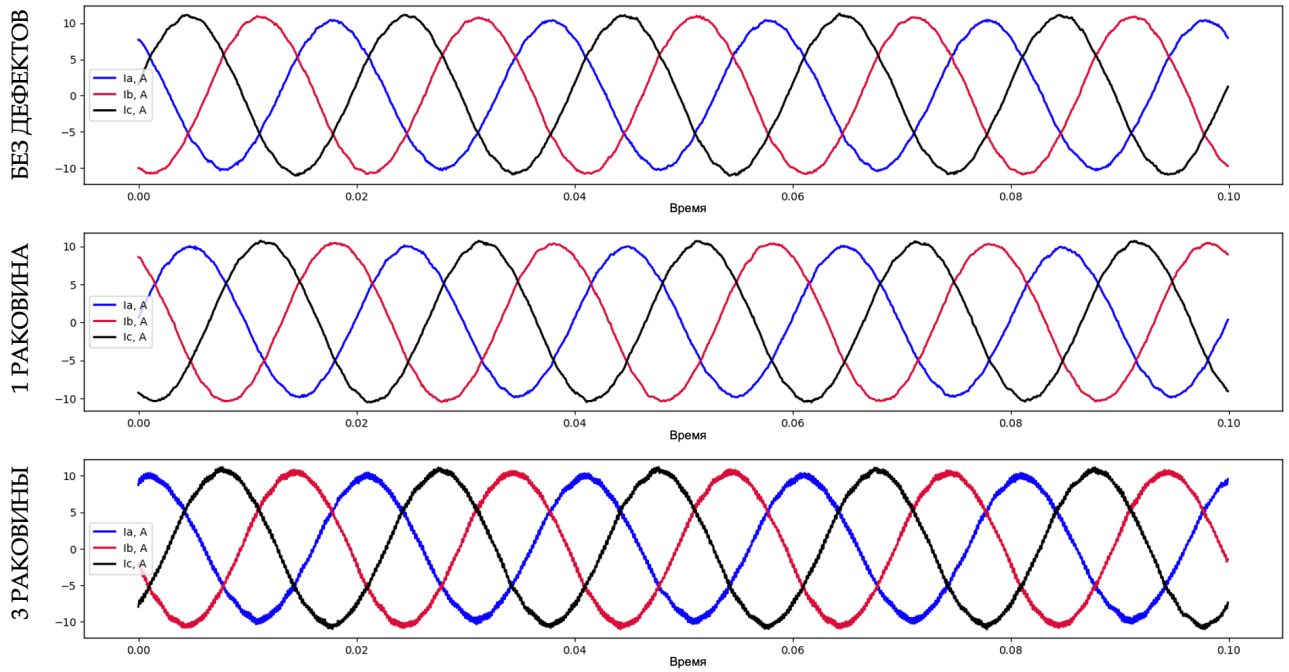


Рисунок 3.12 – Сигналы тока для исправного подшипника, подшипника с одной раковинной, подшипника с тремя раковинами

Как видно из осциллограмм, наличие дефекта с одной раковинной не вносит искажений в ток и напряжение, дальнейшее развитие дефекта проявляется в искажении тока, однако на напряжении это не проявляется. В работе сигналы напряжения (рисунок 3.13) не рассматриваются.

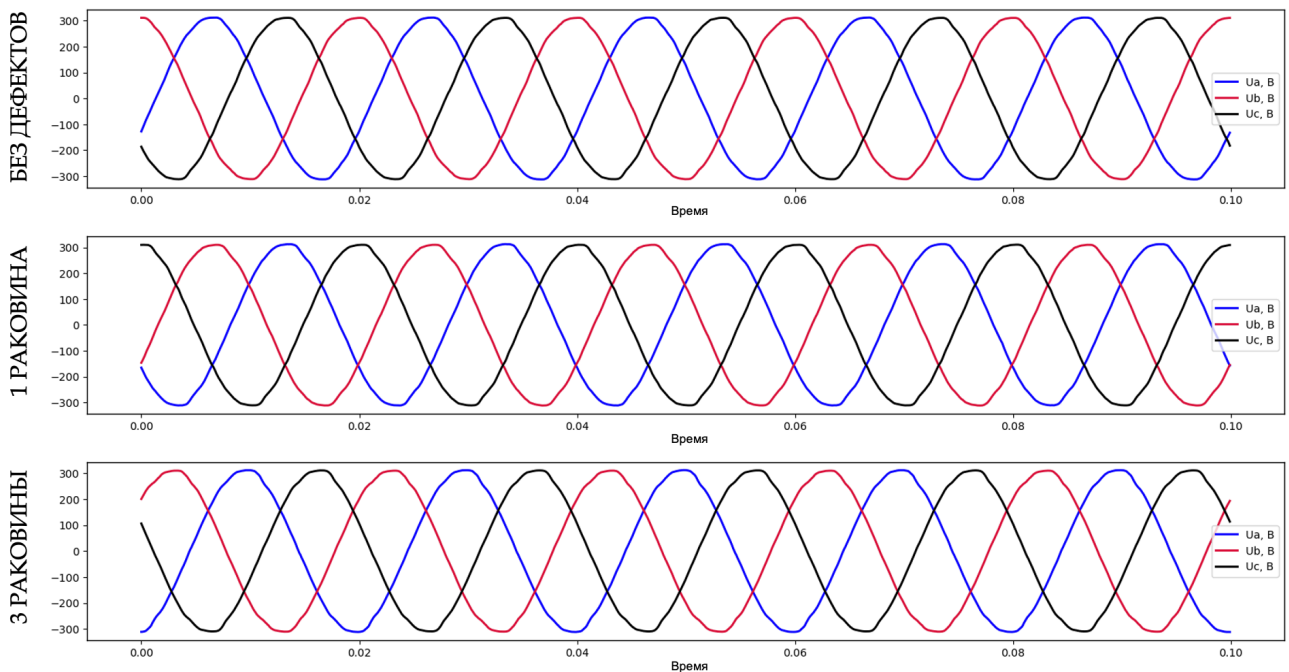


Рисунок 3.13 – Сигналы напряжения для исправного подшипника, подшипника с одной раковинной, подшипника с тремя раковинами

Однако в случае реального технологического процесса напряжения могут содержать искажения, которые обусловлены наличием нелинейной и резкопеременной нагрузки на общей шине питания [134]. В этом случае следует использовать временные ряды напряжения для выявления данных искажений и исключения их влияния на результат обнаружения повреждения.

На основании представленного алгоритма разложения и группировки компонент были обработаны сигналы тока трех фаз асинхронного двигателя в рассматриваемых режимах работы.

На рисунке 3.14 показаны первые 12 компонент исходного ряда в виде ганкелиризованных элементарных матриц, расположенных в порядке убывания их вклада в реконструируемый временной ряд.



Рисунок 3.14 – Сопоставление разложения траекторных матриц 12-ти компонент трех рассматриваемых сигналов (фазы А, В, С) в трех состояниях системы

Одним из способов, рассматриваемых в литературе, является визуальная оценка полученных результатов. На основе которой установлено характерное изменение некоторых компонент, выделенных на рисунке 3.14. При появлении и увеличении дефекта нестационарная компонента увеличивает свой вклад в общую структуру сигнала, что приводит к увеличению ее порядкового номера. Необходимо отметить, что при наличии 3-х раковин, то есть явного проявления дефекта, во всех фазах появляется вырожденная компонента \tilde{X}_2 : $\det(\tilde{X}_2) \rightarrow 0$.

Графики на рисунке 3.15 изображают относительный и кумулятивный вклад первых 12-ти компонент. Ввиду значительного вклада первых двух компонент графики представлены попарно: графики в каждом из режимов включают все компоненты (слева), а последующие исключают первые две компоненты (справа) для более наглядного представления.

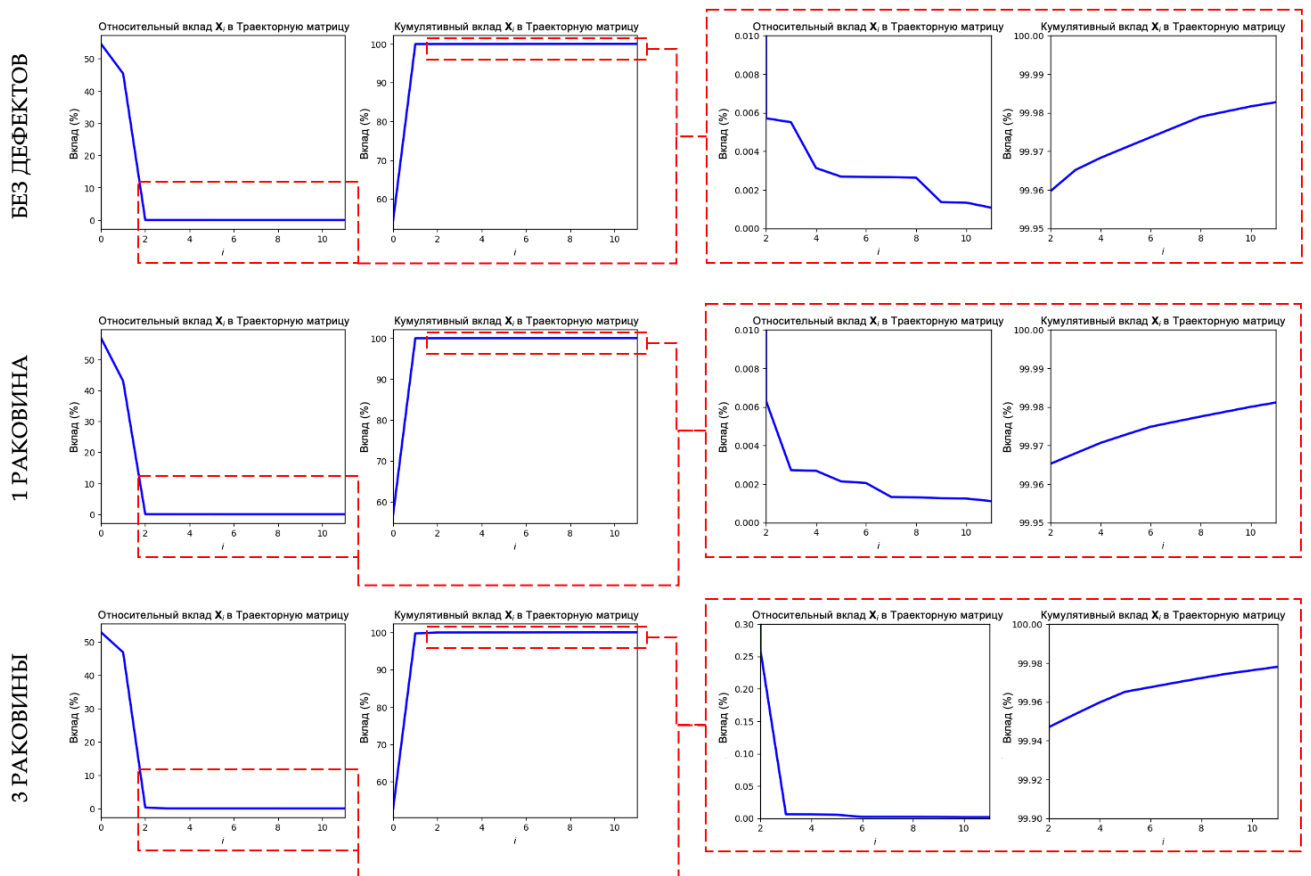


Рисунок 3.15 – Относительный и кумулятивный вклад компонент: [0..11] (слева), [2..11] (справа) для фазы А исправного подшипника, подшипника с одной раковиной, подшипника с тремя раковинами

Полный результат расчета вклада компонент приведен в таблице 3.3:

Таблица 3.3 – Сравнение полученных результатов расчета вклада компонент

X_i	Относительный вклад			Кумулятивный вклад		
	Без дефектов	1 раковина	3 раковины	Без дефектов	1 раковина	3 раковины
Фаза А						
0	54,588734	56,928886	52,862365	54,588734	56,928886	52,862365
1	45,365214	43,030047	46,825041	99,953948	99,958933	99,687407
2	0,005713	0,006323	0,259554	99,959661	99,965256	99,946961
3	0,005507	0,002725	0,006455	99,965169	99,96798	99,953416
4	0,003133	0,002691	0,006271	99,968302	99,970671	99,959687
5	0,002687	0,00214	0,005474	99,970989	99,972811	99,965161
6	0,002667	0,002054	0,002385	99,973656	99,974865	99,967546
7	0,002657	0,001333	0,002383	99,976313	99,976197	99,969928
8	0,00263	0,001311	0,002319	99,978943	99,977508	99,972247
9	0,001364	0,001263	0,002208	99,980308	99,978772	99,974456
10	0,001339	0,00125	0,001797	99,981646	99,980022	99,976253
11	0,001077	0,001114	0,001792	99,982723	99,981136	99,978045
Фаза В						
0	53,291363	54,165786	56,725008	53,291363	54,165786	56,725008
1	46,668971	45,80813	43,042536	99,960334	99,973915	99,767544
2	0,004136	0,002663	0,196508	99,96447	99,976578	99,964052
3	0,004097	0,002637	0,004419	99,968566	99,979215	99,96847
4	0,002899	0,001347	0,004193	99,971465	99,980562	99,972664
5	0,002669	0,001284	0,002074	99,974134	99,981845	99,974738
6	0,002222	0,001078	0,001842	99,976355	99,982923	99,97658
7	0,002109	0,001074	0,00183	99,978464	99,983998	99,97841
8	0,002087	0,00073	0,001431	99,980551	99,984728	99,979841
9	0,001834	0,000696	0,001348	99,982385	99,985424	99,981189
10	0,001823	0,00068	0,001343	99,984208	99,986104	99,982533
11	0,000956	0,000639	0,001333	99,985164	99,986743	99,983865
Фаза С						
0	56,876428	53,698498	54,712877	56,876428	53,698498	54,712877
1	43,059692	46,248323	45,048668	99,936119	99,946822	99,761545
2	0,023789	0,021773	0,171188	99,959908	99,968595	99,932733
3	0,00614	0,00317	0,024359	99,966048	99,971764	99,957092
4	0,005854	0,003154	0,008227	99,971903	99,974919	99,965319
5	0,002469	0,001771	0,00797	99,974372	99,97669	99,973289
6	0,00245	0,001725	0,002551	99,976822	99,978414	99,97584
7	0,002245	0,001343	0,002525	99,979067	99,979757	99,978365
8	0,002236	0,001341	0,00143	99,981303	99,981098	99,979795
9	0,001323	0,001026	0,001423	99,982626	99,982125	99,981218
10	0,001185	0,001019	0,001344	99,983811	99,983144	99,982562
11	0,001128	0,000945	0,001319	99,984939	99,984089	99,983881

Результаты оценки показывают, что 12 первых сингулярных значений описывают 99,98% всей информации исходного сигнала во всех трех режимах, следовательно, существенная потеря информативности исключается. Используя уровень вклада и отслеживание перемещения характерных временных рядов, становится возможным наблюдение как за появлением новых компонент в сигнале тока, так и за изменением вклада определенных компонент в общую структуру. При появлении и увеличении дефекта ряд компонент как нестационарного, так и стационарного характера, увеличивают свой вклад в общую структуру сигнала, что приводит к увеличению их порядковых номеров. Такая структура представления данных позволяет формировать сингулярные компонентные диагностические карты (СКДГ), которые впоследствии при периодической оценке возможно использовать для выявления изменений в работе электромеханического оборудования.

Как видно из таблицы 3.3, отслеживание проявления дефекта на ранней стадии по компонентам 0 и 1, у которых основной кумулятивный вклад более 99%, не представляется возможным. Явно выраженной корреляции изменения этих компонент между режимами «без дефекта» и «1 раковина» не обнаружено, а незначительные изменения могут быть обусловлены нестационарностью множества факторов, в том числе особенностями самого способа разложения.

При 3 раковинах неявно прослеживается суммарное увеличение вклада этих компонент относительно нормального состояния. Для однозначной оценки вклада и фиксации проявления компонентного изменения в сигнале тока, обусловленного именно наличием начальной стадии дефекта, необходимо выделить группы компонент более низкого порядка, которые при наличии повреждения изменяют свое положение в уровне вклада, и оценить изменение их вклада во всех трех состояниях. Однако для этого необходимо рассмотреть способы группировки компонент (раздел 2.5.2).

На рисунке 3.16 представлен метод группировки на основе скаттерограмм компонент \tilde{X}_{0-11} при дефектах подшипника. Скатерограмма представляет собой график, использующий декартовы координаты для отображения значений двух

полученных компонент, сопоставляемых между собой. Данные отображаются в виде траекторий, полученных путем построения значения одной компоненты, определяющей положение на горизонтальной оси, и значение другой компоненты, определяющей положение на вертикальной оси. Корреляционная связь между компонентами тем больше, чем ближе получившаяся траектория на плоскости к окружности.

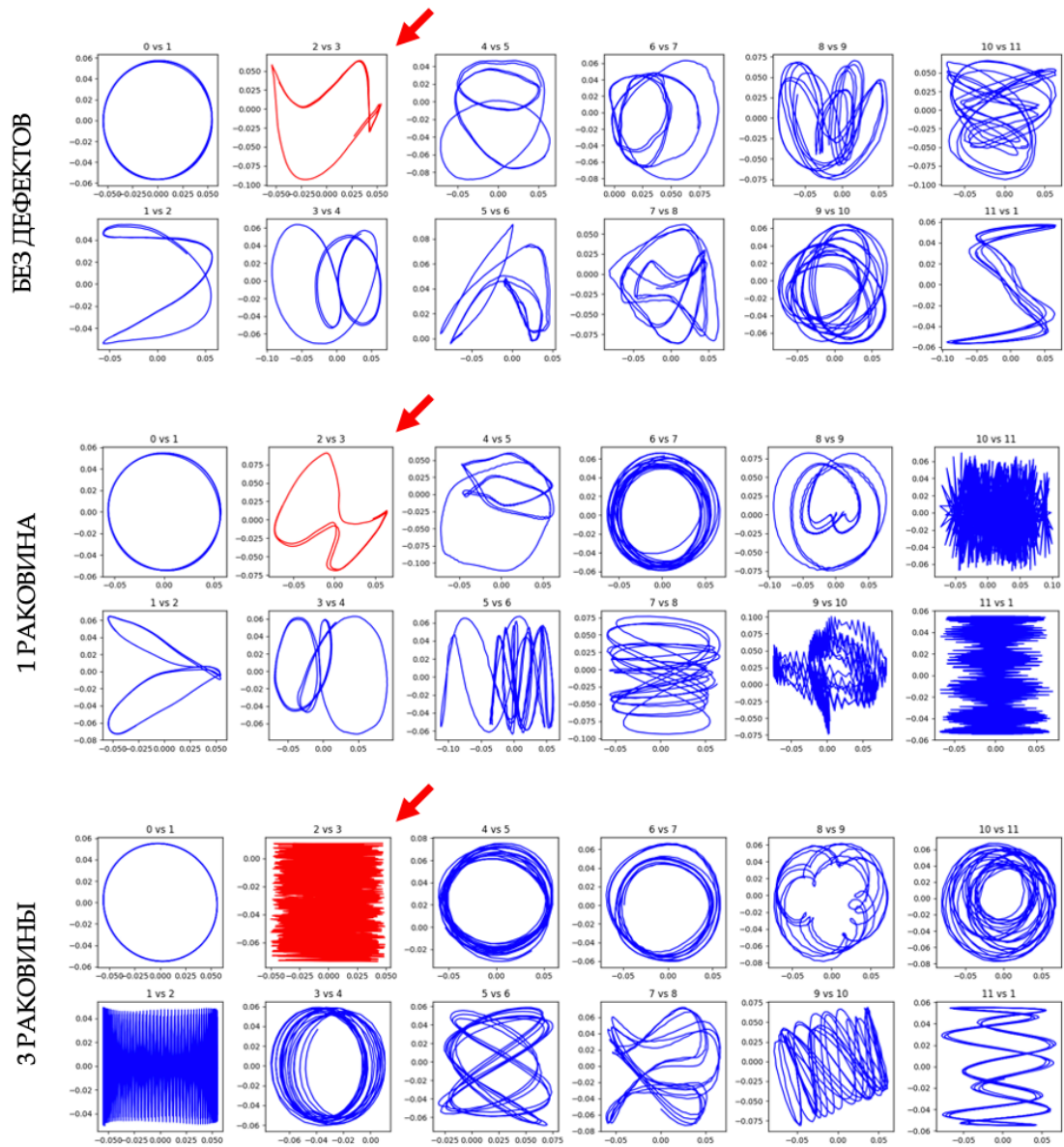


Рисунок 3.16 – Скаттерограммы собственных векторов для фазы А исправного подшипника, подшипника с одной раковиной, подшипника с тремя раковинами

Правильная форма окружности представляет отчетливую связь между компонентами 1 и 2 в каждом из рассматриваемых случаев. Точно так же группируются компоненты 5, 6, 7 и 8 вместе для подшипника без дефектов по

замкнутым кривым одинаковой формы. И для экспериментов подшипников с образованием раковин не представляется возможным объединение компоненты 2 ни с одной из соседних групп.

Метод на основе иерархической кластеризации заключается в последовательной группировке схожих пар на основе расстояний; объединение продолжается до тех пор, пока все объекты не будут составлять один кластер (рисунок 3.17). В результате строится дерево групп, называемое дендрограммой, изображающей взаимные связи между объектами из заданного множества. Количество групп зависит от порогового значения; чем выше порог (ось Y), тем меньшее число групп будет на выходе.

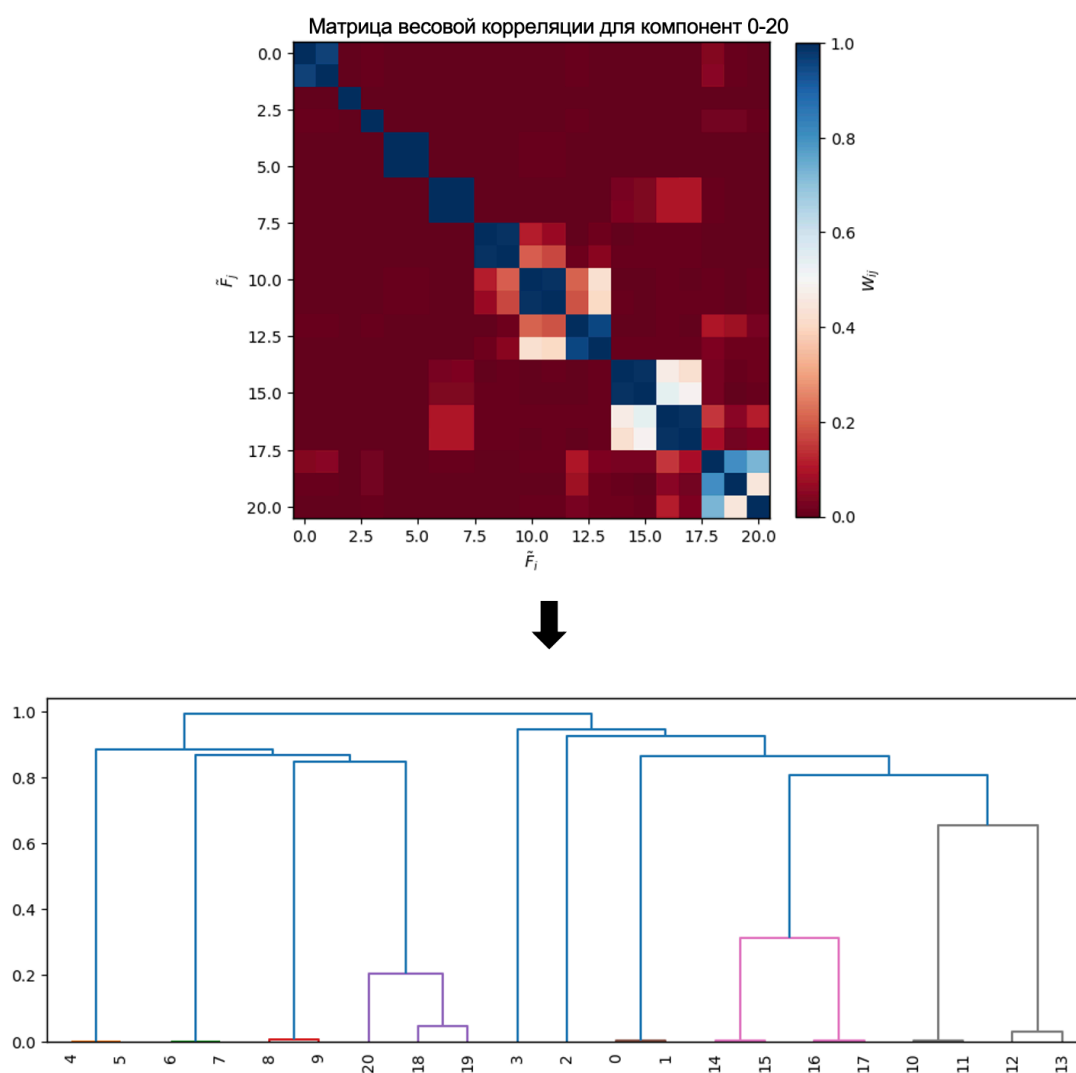


Рисунок 3.17 – Визуализация выполнения алгоритма группировки компонент методом иерархической кластеризации по матрице весовой корреляции для фазы А исправного подшипника

В таблице 3.4 представлены результаты группировки методом иерархической кластеризации, а также сравнение с группировкой на основе скаттерограмм и визуальной группировкой на основе ганкелевых матриц.

Таблица 3.4 – Сравнение полученных результатов группировки компонент

	Визуальная группировка	Скаттерограммы	W-корреляционная матрица, $threshold = 0,8$	W-корреляционная матрица, $threshold = 0,9$
Без дефектов				
I_a	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [9, 10, 11] Группа 4: [5, 6, 7, 8]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6, 7, 8] Группа 4: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6, 7, 8] Группа 4: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1, 9, 10, 11] Группа 1: [2, 3, 5, 6, 7, 8] Группа 2: [4]
I_b	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6] Группа 4: [7, 8, 9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6] Группа 4: [7, 8] Группа 5: [9, 10] Группа 6: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6] Группа 4: [7, 8] Группа 5: [9, 10] Группа 6: [11]	Тренд: [0, 1, 2, 3, 7, 8] Группа 1: [4, 5, 9, 10, 11] Группа 2: [6]
I_c	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 9] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [10, 11] Группа 4: [5, 6, 7, 8]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8] Группа 5: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8] Группа 5: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 5, 6, 9, 10, 11] Группа 3: [7, 8]
1 раковина				
I_a	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [5, 6] Группа 3: [7, 8, 11] Группа 4: [3, 4, 9, 10]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [9, 10] Группа 5: [7, 8, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 11] Группа 5: [9, 10]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 7, 8, 11] Группа 3: [5, 6, 9, 10]
I_b	Тренд: [0, 1] Группа 1: [4, 5] Группа 2: [8, 11] Группа 3: [9, 10] Группа 4: [2, 3, 6, 7]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 7] Группа 4: [8, 9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 8, 9, 10, 11] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 7]	Тренд: [0, 1, 4, 5] Группа 1: [2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
I_c	Тренд: [0, 1, 7] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 8] Группа 4: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5, 6, 7, 8] Группа 4: [9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5, 6, 7, 8] Группа 4: [9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1, 11] Группа 1: [2, 5, 6, 7, 8] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [9, 10]

Продолжение Таблицы 3.4

3 раковины				
I_a	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 8, 9] Группа 3: [5] Группа 4: [6, 7, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 5] Группа 3: [6, 7] Группа 4: [8, 9] Группа 5: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 5] Группа 3: [6, 7, 8, 9] Группа 4: [10, 11]	Тренд: [0, 1, 6, 7, 8, 9] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 5, 10, 11]
I_b	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4, 8, 11] Группа 3: [5] Группа 4: [6, 7, 9, 10]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5] Группа 4: [6, 7] Группа 5: [8] Группа 6: [9, 10] Группа 7: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3, 4] Группа 3: [5] Группа 4: [6, 7] Группа 5: [8, 11] Группа 6: [9, 10]	Тренд: [0, 1, 3, 4, 8, 11] Группа 1: [2] Группа 2: [5] Группа 3: [6, 7, 9, 10]
I_c	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3] Группа 3: [4, 5, 10, 11] Группа 4: [6, 7, 8, 9]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3] Группа 3: [4, 5] Группа 4: [6, 7] Группа 5: [8, 9] Группа 6: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2] Группа 2: [3] Группа 3: [4, 5] Группа 4: [6, 7] Группа 5: [8, 9] Группа 6: [10, 11]	Тренд: [0, 1, 10, 11] Группа 1: [2] Группа 2: [3] Группа 3: [4, 5, 6, 7, 8, 9]

Результаты проведенной группировки тремя методами показали следующее: метод скаттерограмм и метод иерархической кластеризации демонстрируют одинаковую эффективность при выделении компонент. Количество итераций при сравнении компонент скаттерограммами исчисляется десятками для одного состояния; иерархическая кластеризация, напротив, носит автоматический характер и почти не требует человеческого вмешательства. Поэтому процедура группировки в дальнейшем базируется на данном методе.

Результаты демонстрируют тенденцию выделения компонент \tilde{X}_2 и \tilde{X}_3 в индивидуальные группы, данная тенденция прослеживается при любом из приведенных подходов группировки, также вклад этих сгруппированных компонент увеличивается на порядки при увеличении уровня дефекта. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о наиболее вероятной дифференциации данных компонент как отвечающих за развитие повреждения, что соответствует возможности идентификации дефекта на ранней стадии на основе временных рядов мгновенных значений тока посредством предложенного алгоритма.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. SVD обеспечивает однозначное определение наличия (по проявлению характерных компонент) и развития дефекта (по уровню вклада компонент);
2. При изменении уровня дефекта АД изменяется группировка компонент.

3.2.2. Исследование дефекта образования раковин в подшипниках методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД

Вывод об изменении группировки компонент при изменении технического состояния АД подводит к выявлению свойства миграции компонент.

Миграция характеризуется двумя факторами:

1. Степень перемещения компоненты (иначе – на какое количество позиций компонента сместилась) $|i_B - i_A| > 0$, где i_A, i_B – номер компоненты в состояниях машины А и В соответственно;
2. Частота перемещений на наблюдаемых отрезках сигнала $\omega = \frac{n}{\sum i}$, где n – наблюдаемое количество перемещений компоненты при сравнении состояний АД при оценке одного вида дефекта.

Оценка явления миграции производится относительно исходного состояния АД и позволяет разделить ряд оцениваемых компонент на две категории, именуемые в данном контексте слабостационарными и мигрирующими.

Таким образом, численная оценка вклада может производиться поступательно (рисунок 3.18): от оценки вклада в исходный сигнал индивидуальных компонент при более явных проявлениях дефектов (как в случае с раковинами подшипников) $|RC(X_i)_B - RC(X_i)_A| > 0$, до оценки вклада групп на основании иерархической кластеризации $|RC(G_i)_B - RC(G_i)_A| > 0$; и на последнем этапе, при слабой делимости состояний системы, выполняется переход к оценке категорий компонент $|RC(C_i)_B - RC(C_i)_A| > 0$.

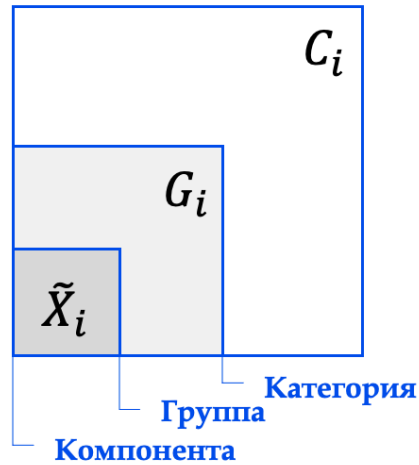


Рисунок 3.18 – Схема поступательной оценки вкладов

Используем данный подход применительно к исследованию образования раковин в подшипниках методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД. В таблице 3.5 представлены результаты расчета относительного вклада компонент в исходный сигнал. Для обобщенного тока при разделении компонент более характерно проявляется попарное распределение компонент. Группа 1 – трендовая, формирующая сигнал – \tilde{X}_0 ; за базис принято нормальное состояние двигателя при номинальной нагрузке, для этого режима: группа 2 – \tilde{X}_1, \tilde{X}_2 ; группа 3 – \tilde{X}_3, \tilde{X}_4 ; группа 4 – \tilde{X}_5, \tilde{X}_6 ; группа 5 – \tilde{X}_7, \tilde{X}_8 ; группа 6 – $\tilde{X}_9, \tilde{X}_{10}, \tilde{X}_{11}$ (...). Цветовыми обозначениями выделены перемещения компонент (таблица 3.5), например, компоненты \tilde{X}_7 и \tilde{X}_8 в состоянии подшипника без дефектов перемещаются на позиции 5 и 6 соответственно при наличии одной раковины, и затем – встают на места \tilde{X}_3 и \tilde{X}_4 при трех раковинах, увеличивая суммарный вклад с 0,248% до 1,324% или 5,3 раза. Более явное проявление компонент, отвечающих за дефект, также выражается в уменьшении вклада основной компоненты, формирующей сигнал, на 6,209%.

Таблица 3.5 – Результаты расчета относительного вклада компонент

X_i	Относительный вклад		
	Без дефектов	1 раковина	3 раковины
0	87,551	87,515	81,342
1	4,823	4,189	7,926
2	4,812	4,183	7,924
3	0,759	0,935	0,663

Продолжение Таблицы 3.5

4	0,751	0,934	0,661
5	0,178	0,727	0,387
6	0,175	0,720	0,387
7	0,124	0,117	0,076
8	0,124	0,116	0,076
9	0,091	0,066	0,044
10	0,090	0,065	0,044
11	0,047	0,051	0,022

Таким образом, прирост вклада компонентного состава позволяет явно определить наличие зарождающегося дефекта, а впоследствии наблюдать за его развитием. При этом суммарный вклад компонент $\tilde{X}_3 - \tilde{X}_6$ более информативен для отслеживания начальной стадии (рисунки 3.19-21).

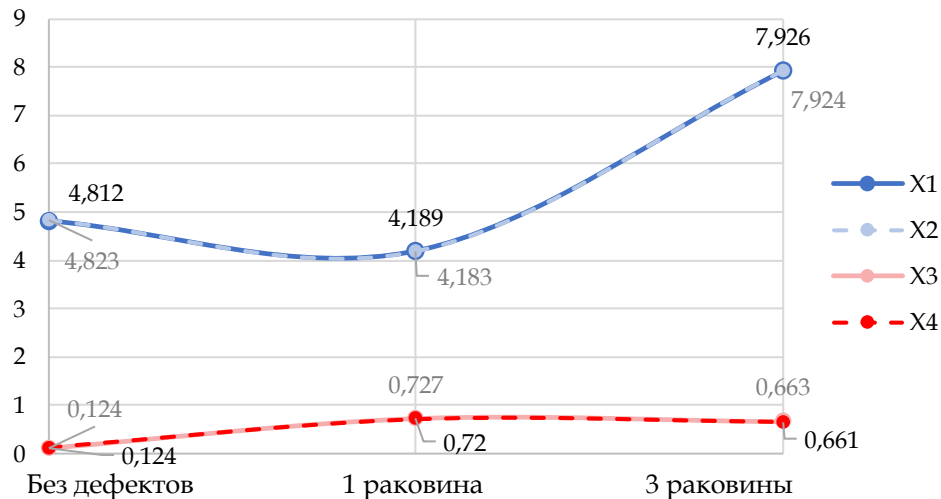


Рисунок 3.19 – Изменения вкладов в зависимости от уровня развития дефекта подшипника для исследуемых компонент с учетом миграции по таблице 3.5

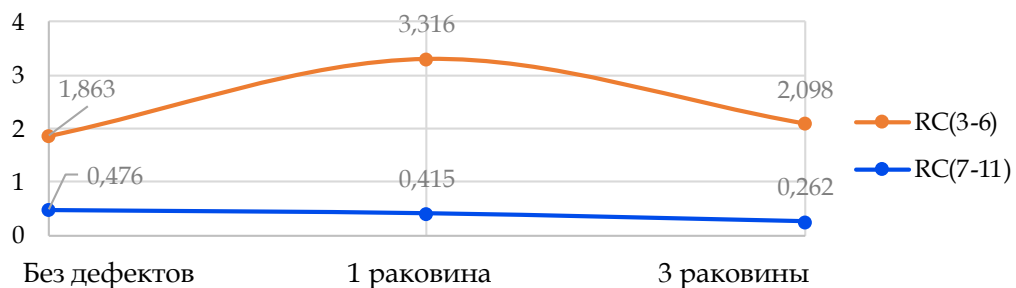


Рисунок 3.20 – Изменения вкладов трендовой компоненты \tilde{X}_0 (группа 1) и суммарного вклада компонент $RC(\tilde{X}_{1-2})$ (группа 2)

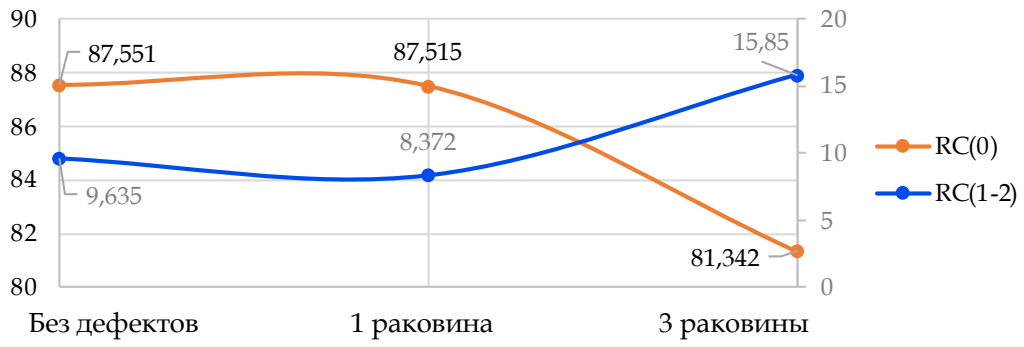
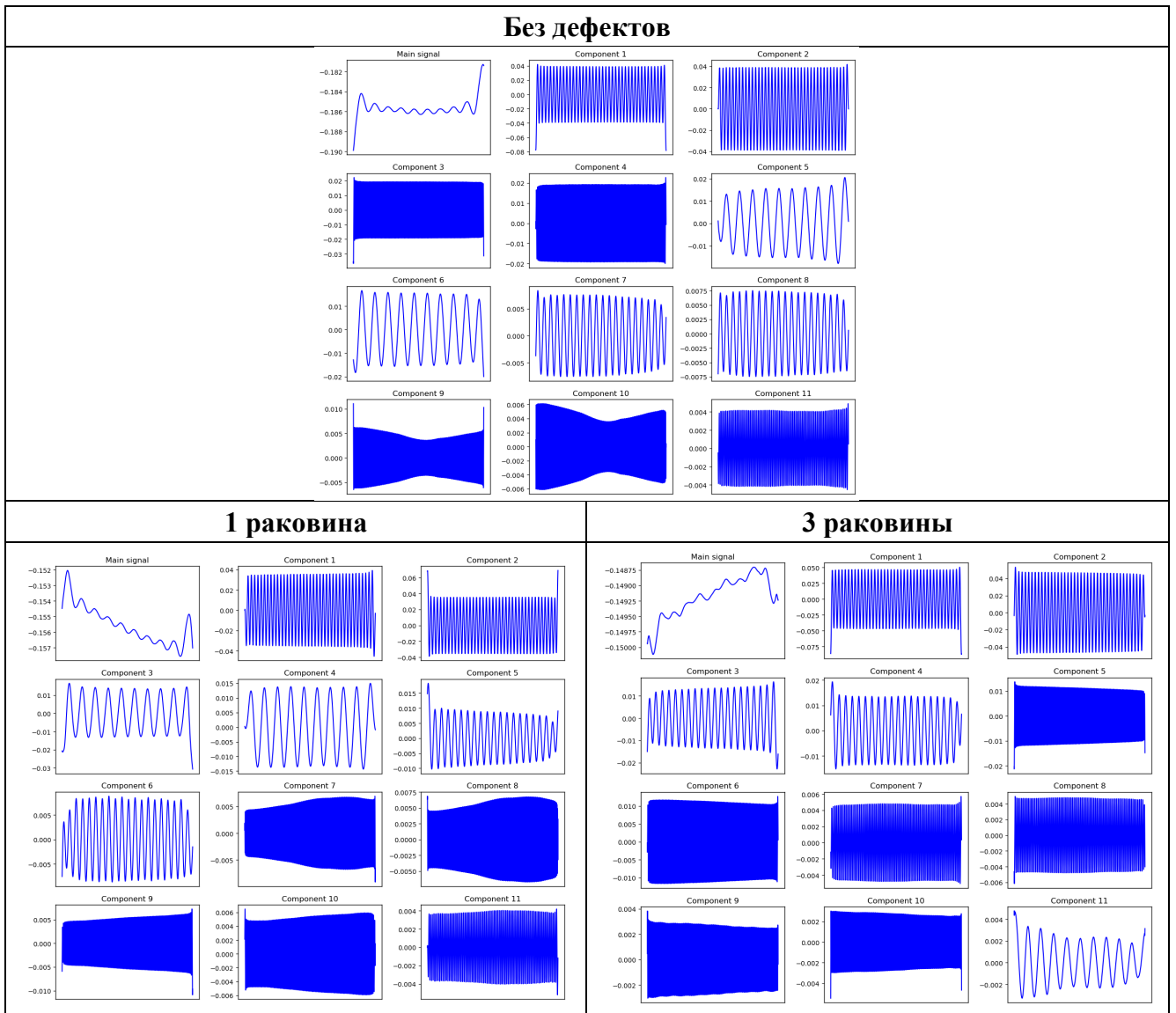


Рисунок 3.21 – Изменение суммарных вкладов компонент $RC(\tilde{X}_{3-6})$ и $RC(\tilde{X}_{7-11})$

Таблица 3.6 – Сравнение результатов процедуры разложения и восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД для эксперимента «дефект подшипника» при номинальной нагрузке



3.3 Исследование несоосности

3.3.1. Исследование несоосности методом сингулярного спектрального анализа токов фаз статора АД

Анализ полученных результатов производится аналогично тому, как описано в разделе 3.2.1 В данном случае также рассмотрим влияние нагрузки на изменение компонентного состава и его поведение. Результаты расчета относительного вклада для проведенных экспериментов типа «несоосность» представлены в таблице 3.7, где «НС 1» и «НС 2» – это «Несоосность 1» и «Несоосность 2» соответственно.

Таблица 3.7 – Результаты расчета относительного вклада компонент

X_i	Номинальная нагрузка			X_i	Режим холостого хода		
	Нормальное состояние	НС 1	НС 2		Нормальное состояние	НС 1	НС 2
0	52,031	56,566	52,293	0	52,268	56,571	56,241
1	47,567	42,825	46,894	1	47,478	42,713	43,430
2	0,093	0,140	0,157	2	0,091	0,134	0,118
3	0,088	0,126	0,138	3	0,087	0,124	0,112
4	0,018	0,081	0,134	4	0,016	0,089	0,017
5	0,016	0,065	0,128	5	0,015	0,081	0,015
6	0,014	0,045	0,093	6	0,011	0,072	0,015
7	0,014	0,030	0,059	7	0,007	0,061	0,009
8	0,010	0,023	0,020	8	0,007	0,059	0,007
9	0,010	0,023	0,019	9	0,004	0,031	0,006
10	0,009	0,009	0,014	10	0,004	0,009	0,006
11	0,007	0,008	0,013	11	0,003	0,009	0,004

Как видно из таблиц 3.7-3.9, проследить миграцию становится довольно затруднительным, однако визуальная оценка компонентного состава между состояниями машины демонстрирует следующее: при номинальной нагрузке места компонент $\tilde{X}_6 - \tilde{X}_{11}$ в нормальном состоянии занимают новые компоненты при несоосности, а сами компоненты $\tilde{X}_6 - \tilde{X}_{11}$ более не проявляются. В данном случае переходим на третью ступень оценки вклада и разделяем компоненты по принадлежности к категориям. Тогда $\tilde{X}_2 - \tilde{X}_3$ – определим как слабостационарные, а $\tilde{X}_4 - \tilde{X}_{11}$ – мигрирующие. Оценка кумулятивного вклада показывает постепенный рост слабостационарной категории от 0,181% в нормальном состоянии до 0,259%

при несоосности 2й степени. Для мигрирующей категории кумулятивный вклад изменяется от 0,098% до 0,411% или в 4,18 раз. Необходимо отметить, что суммарный вклад основных компонент \tilde{X}_0, \tilde{X}_1 при этом изменяется в меньшей степени, на 0,314%.

В режиме холостого хода в нормальном состоянии можно отметить проявление компоненты \tilde{X}_6 – результатами группировки данная компонента выделяется в отдельную группу. При этом, в остальных состояниях данная компонента визуально не прослеживается. Категориальная оценка кумулятивного вклада демонстрирует рост слабостационарной категории с 0,178% в нормальном состоянии до 0,23% при несоосности 2й степени и для мигрирующей – от 0,068% до 0,077%. В то же время, по результатам расчета вклада, при несоосности 1 степени наблюдается более явная реакция, и если при номинальной нагрузке отличие от вклада несоосности 2 степени незначительно, то в режиме холостого хода кумулятивный вклад мигрирующей группы вырос в 7,16 раз относительно нормального состояния до 0,481%, а разница со вкладом при несоосности 1 степени – 6,22 раза (рисунки 3.22-23). На данной основе и по визуальной оценке компонентного состава можно констатировать факт реакции сингулярного разложения на изменение нагрузки на валу АД.

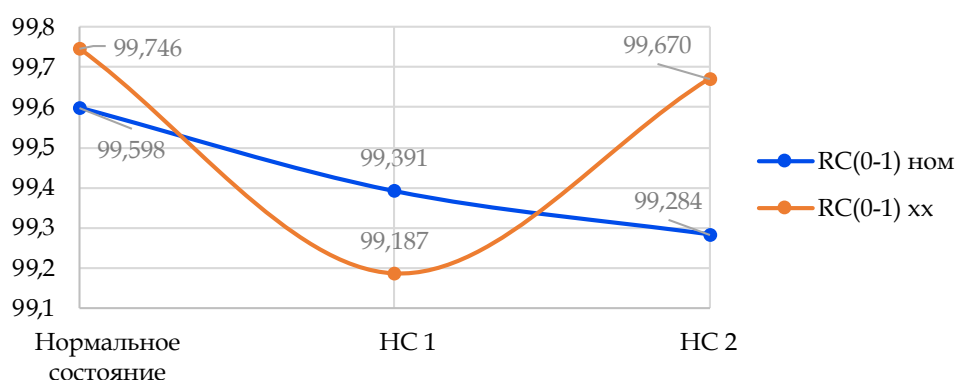


Рисунок 3.22 – Изменение суммарного вклада трендовых компонент, формирующий сигнал, $RC(\tilde{X}_{0-1})$ в разных режимах нагрузки на валу АД

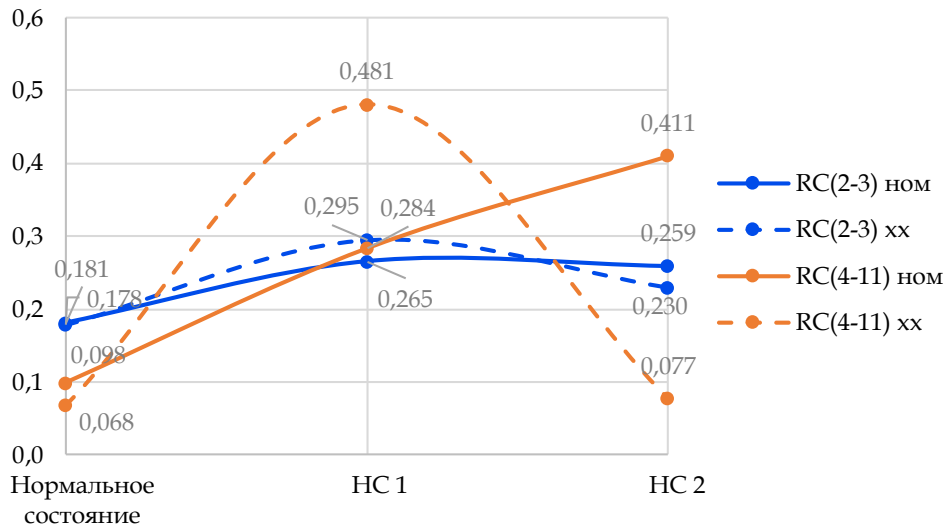
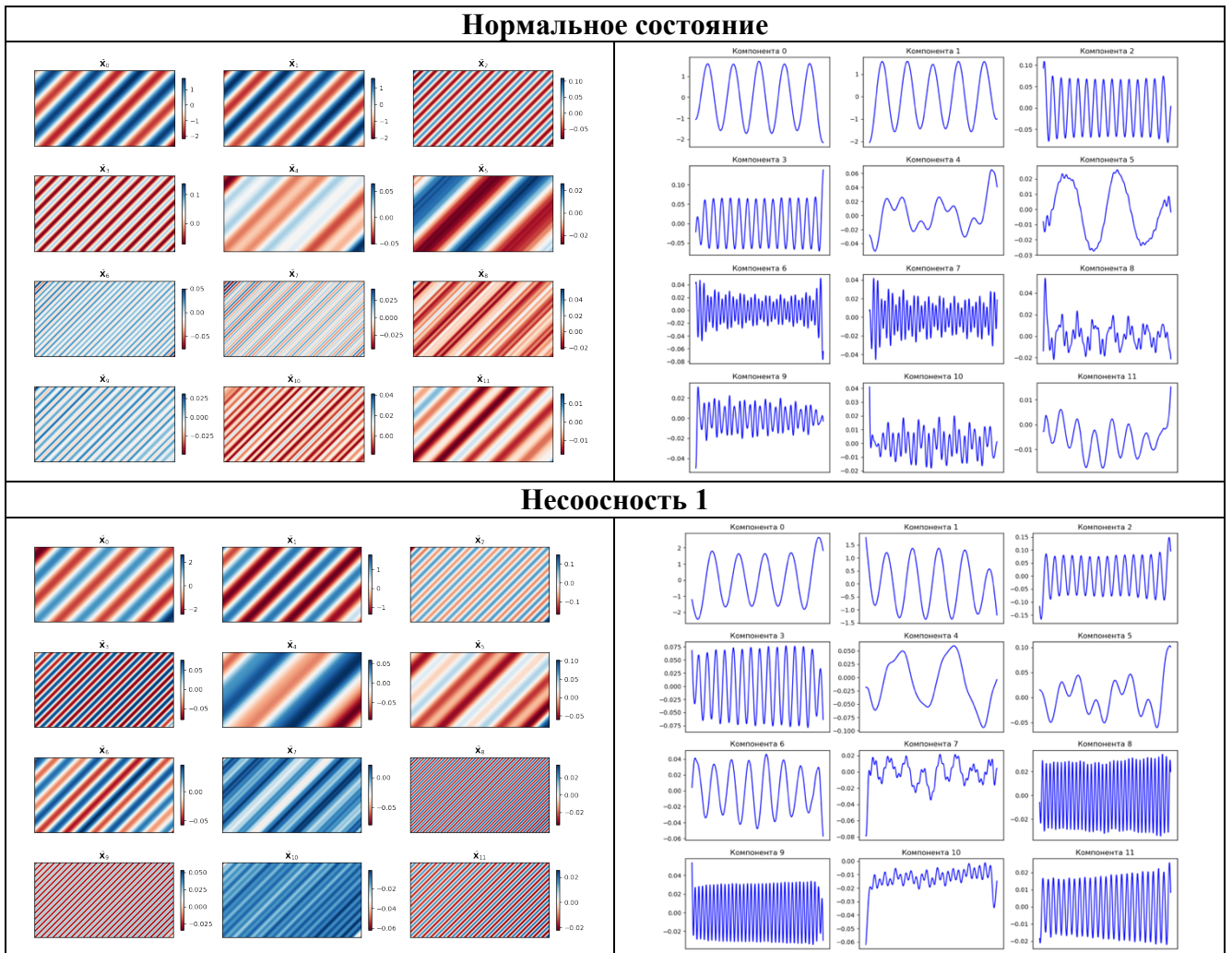


Рисунок 3.23 – Изменение суммарного вклада слабостационарных $RC(\tilde{X}_{2-3})$ и мигрирующих $RC(\tilde{X}_{4-11})$ компонент в разных режимах нагрузки на валу АД

Таблица 3.8 – Сравнение результатов процедуры разложения и восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа токов фаз статора АД для эксперимента «несоосность» при номинальной нагрузке (фаза А)



Продолжение Таблицы 3.8

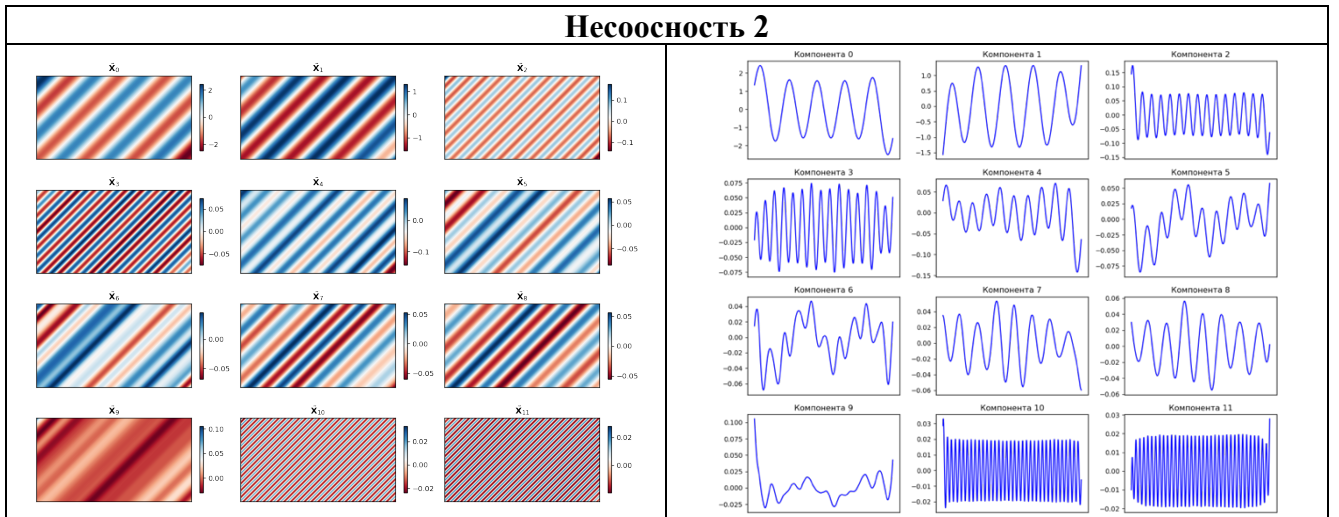
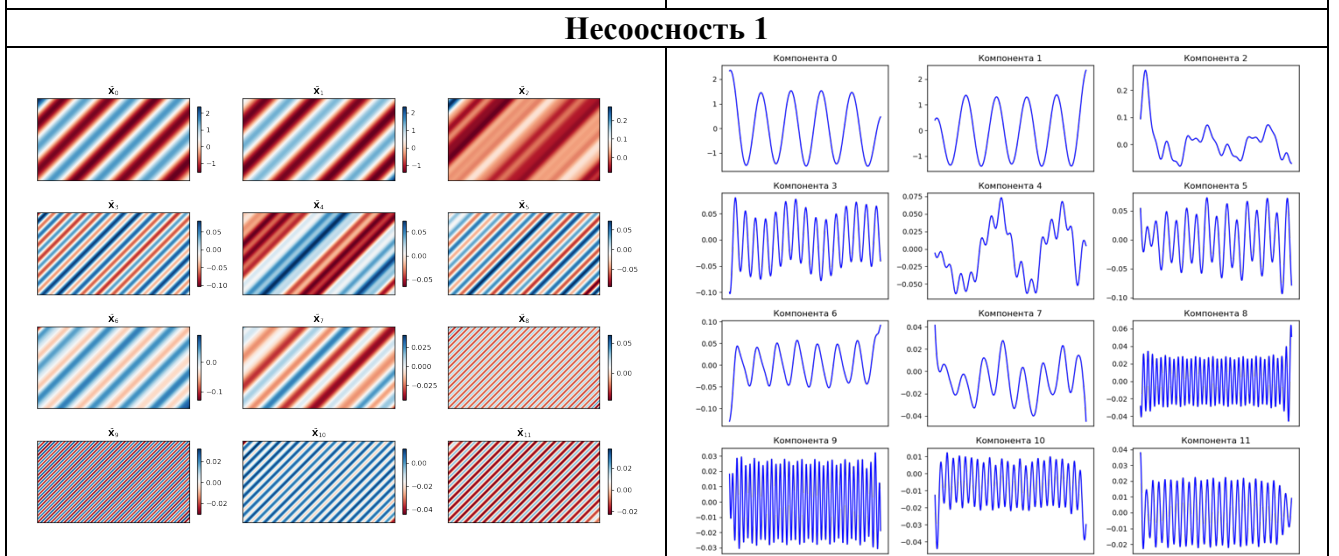
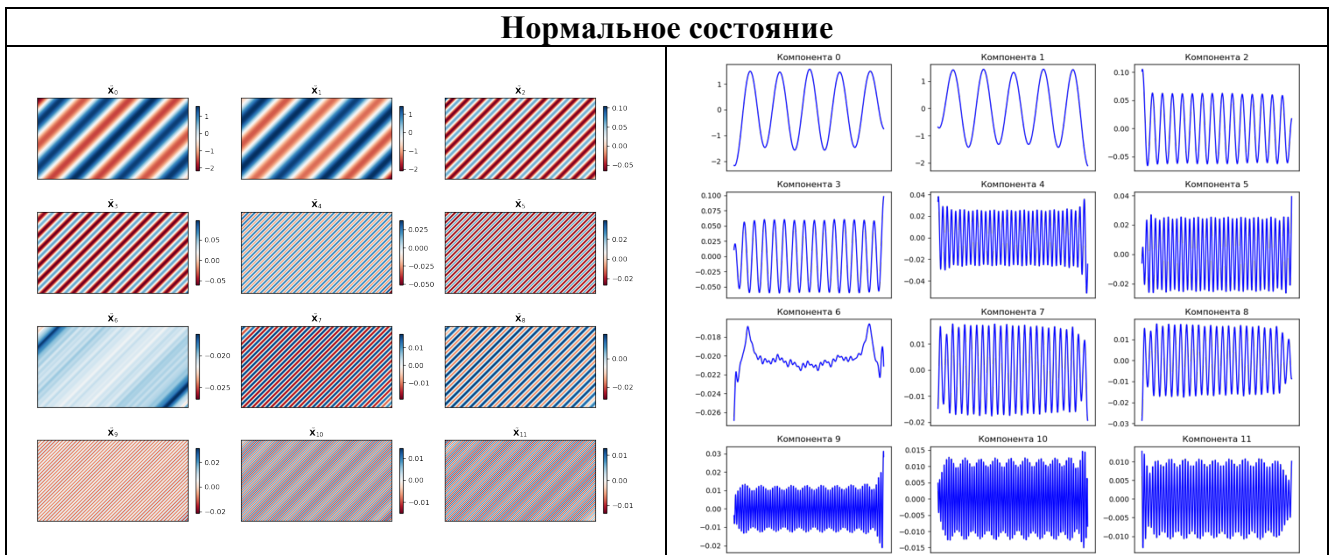
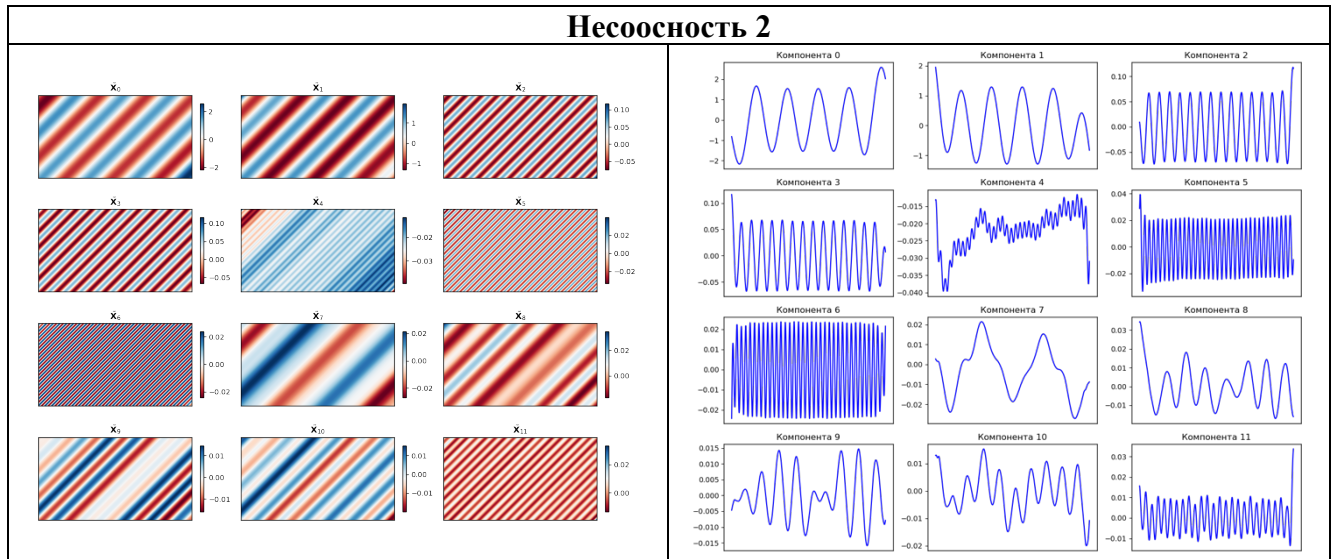


Таблица 3.9 – Сравнение результатов процедуры разложения и восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа токов фаз статора АД для эксперимента «несоосность» в режиме холостого хода (фаза А)



Продолжение Таблицы 3.9



3.3.2. Исследование несоосности методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД

Результаты расчета относительного вклада при анализе модуля обобщенного тока приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты расчета относительного вклада компонент

X_i	Номинальная нагрузка			X_i	Режим холостого хода		
	Нормальное состояние	НС 1	НС 2		Нормальное состояние	НС 1	НС 2
0	94,819	86,494	87,304	0	76,518	83,096	82,081
1	0,977	4,065	3,698	1	7,838	4,957	4,791
2	0,975	4,056	3,696	2	7,834	4,952	4,786
3	0,472	1,309	1,020	3	2,985	1,523	2,741
4	0,470	1,307	1,018	4	2,984	1,509	2,738
5	0,255	0,781	0,688	5	0,369	1,163	0,593
6	0,254	0,756	0,661	6	0,369	1,147	0,566
7	0,150	0,224	0,391	7	0,353	0,393	0,347
8	0,149	0,223	0,375	8	0,353	0,393	0,337
9	0,015	0,090	0,064	9	0,055	0,176	0,178
10	0,015	0,087	0,064	10	0,055	0,176	0,177
11	0,013	0,053	0,023	11	0,039	0,093	0,107

Анализ компонентного состава (таблица 3.11) при разложении модуля обобщенного тока демонстрирует большую разделимость компонент, в следствие чего оценка миграции становится более доступна. Тогда $\tilde{X}_1 - \tilde{X}_4$ – определим как слабостационарные, а $\tilde{X}_5 - \tilde{X}_{11}$ – мигрирующие. При номинальной нагрузке оценка

кумулятивного вклада показывает постепенный рост слабостационарной категории от 2,894% в нормальном состоянии до 9,432% при несоосности 2й степени или в 3,26 раз. Для мигрирующей категории кумулятивный вклад изменяется от 0,851% до 2,266% или в 2,66 раз. Вклад основной компоненты, формирующей сигнал \tilde{X}_0 , при этом, падает на 7,52%. В режиме холостого хода наблюдается обратная ситуация: кумулятивный вклад слабостационарной категории изменяется в меньшую сторону от 21,641% в нормальном состоянии до 15,056% при несоосности 2й степени, а вклад основной компоненты \tilde{X}_0 увеличивается от 76,518% до 82,081%. При этом кумулятивный вклад мигрирующей категории, как и в номинальном режиме, растет от 1,593% до 2,305%. Как и в пофазном разложении, вклады категорий несоосности 1 степени демонстрирует большую реакцию, и разница между несоосностью 1й и 2й степени составляет 1,305%. Отдельно стоит выделить проявление компонент \tilde{X}_5 и \tilde{X}_6 – их суммарный вклад от первой ко второй степени изменяется от 2,3% до 1,16%, соответственно, можно сделать следующий вывод: большая реакция и больший вклад при несоосности 1й степени обусловлен в основном приростом вклада компонент \tilde{X}_5 и \tilde{X}_6 , которые также устойчиво проявляются при несоосности 2 степени, что указывает на то, что эти компоненты в данном эксперименте отвечают за дефект (рисунки 3.24-25).

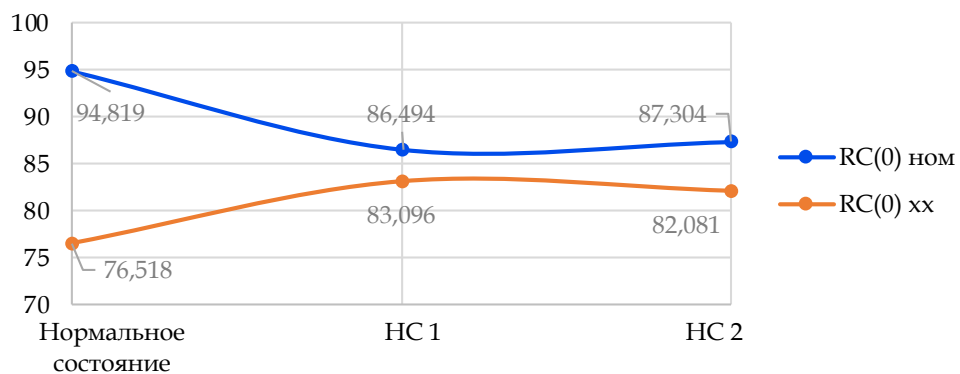


Рисунок 3.24 – Изменение суммарного вклада трендовой компоненты, формирующей сигнал,

$RC(\tilde{X}_0)$ в разных режимах нагрузки на валу АД

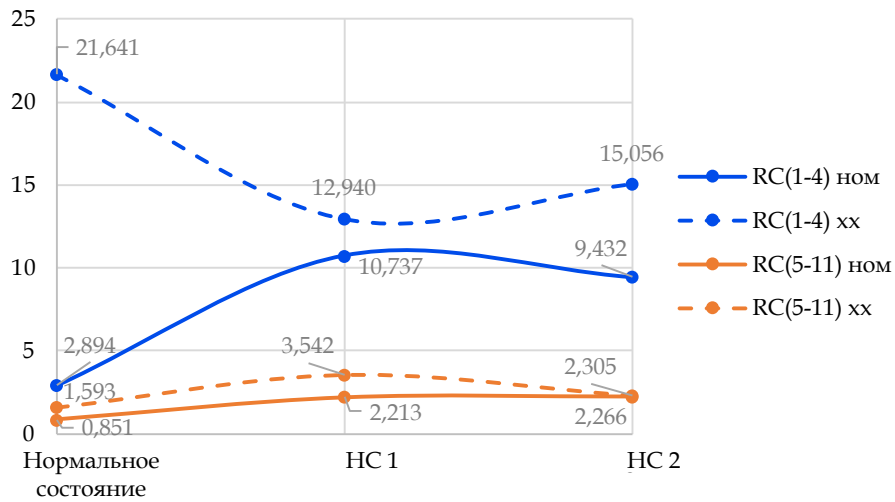
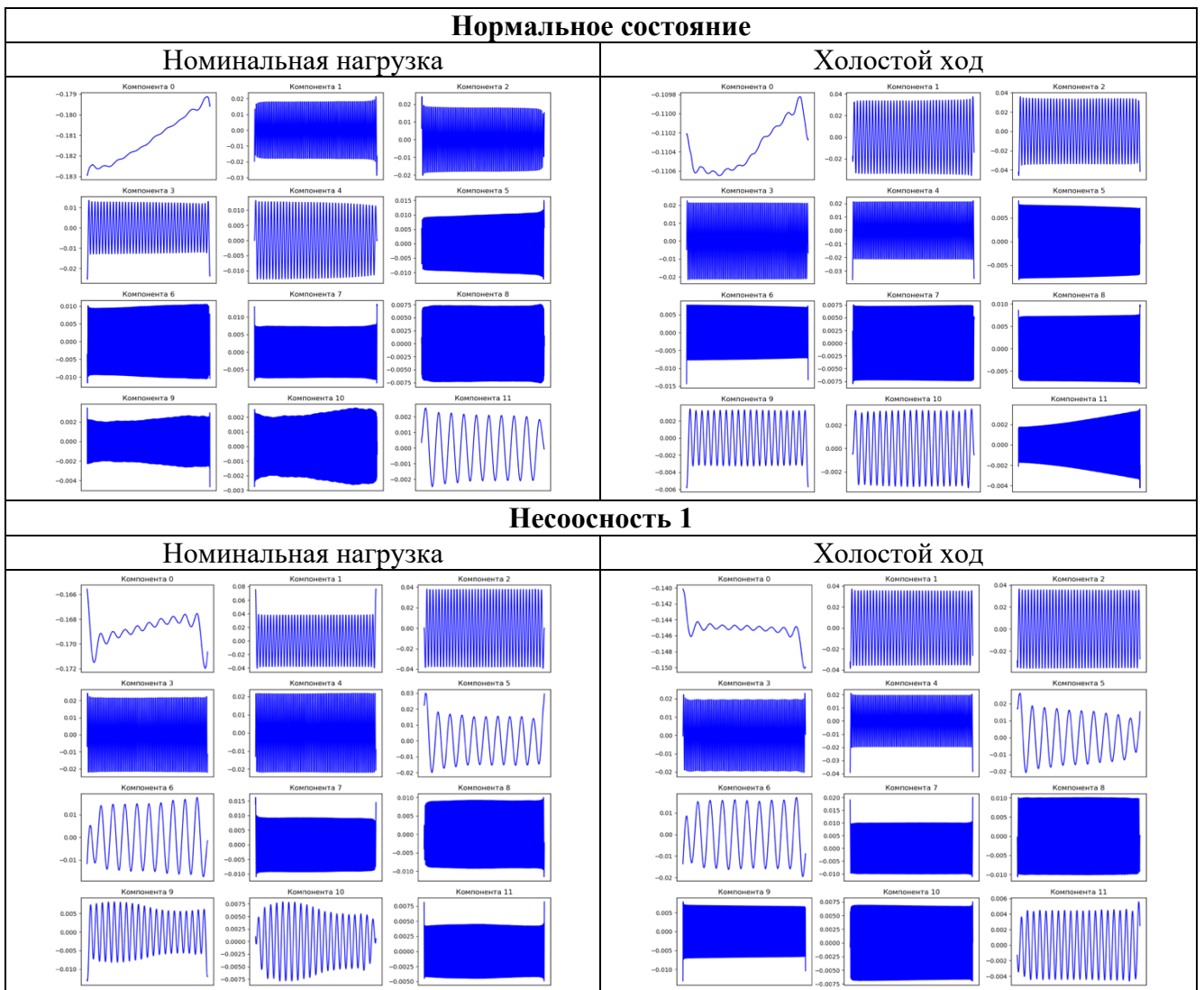
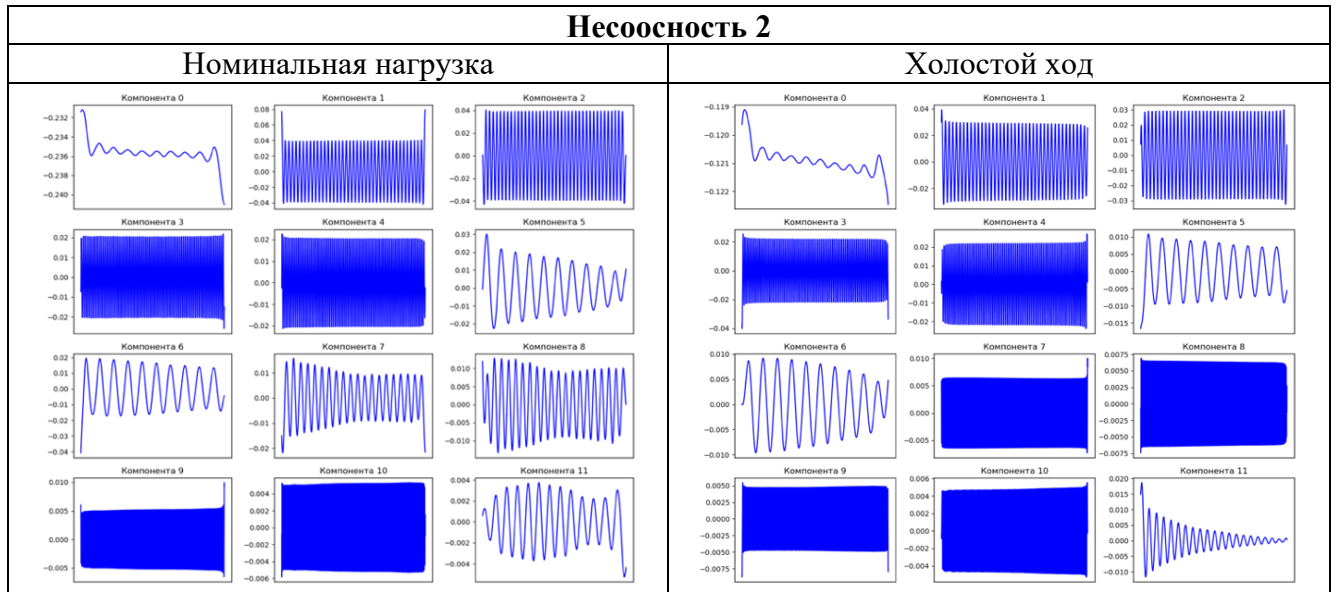


Рисунок 3.25 – Изменение суммарного вклада слабостационарных $RC(\tilde{X}_{1-4})$ и мигрирующих $RC(\tilde{X}_{5-11})$ компонент в разных режимах нагрузки на валу АД

Таблица 3.11 – Сравнение результатов процедуры восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД для эксперимента «несоосность» в разных режимах нагрузки на валу АД



Продолжение Таблицы 3.11



3.4 Исследование механического ослабления креплений

3.4.1. Исследование механического ослабления креплений методом сингулярного спектрального анализа токов фаз статора АД

Результаты расчета относительного вклада для проведенных экспериментов типа «ослабление креплений» представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты расчета относительного вклада компонент

X_i	Номинальная нагрузка				X_i	Режим холостого хода			
	Нормальное состояние	ПЛ	ПП	ПП+ЗП		Нормальное состояние	ПЛ	ПП	ПП+ЗП
0	52,031	56,341	55,382	55,961	0	52,268	52,507	56,319	56,349
1	47,567	43,218	44,248	43,667	1	47,478	47,078	43,298	43,256
2	0,093	0,122	0,099	0,109	2	0,091	0,130	0,118	0,097
3	0,088	0,111	0,095	0,104	3	0,087	0,123	0,111	0,091
4	0,018	0,056	0,044	0,042	4	0,016	0,053	0,038	0,046
5	0,016	0,033	0,020	0,035	5	0,015	0,035	0,035	0,045
6	0,014	0,032	0,019	0,035	6	0,011	0,033	0,034	0,045
7	0,014	0,013	0,016	0,006	7	0,007	0,007	0,007	0,012
8	0,010	0,009	0,013	0,005	8	0,007	0,006	0,007	0,012
9	0,010	0,007	0,012	0,005	9	0,004	0,005	0,006	0,010
10	0,009	0,004	0,008	0,003	10	0,004	0,003	0,005	0,009
11	0,007	0,002	0,007	0,003	11	0,003	0,003	0,004	0,009

Аналогично последовательности анализа, представленного в разделе 3.3, определим $\tilde{X}_2 - \tilde{X}_3$ как слабостационарные, а $\tilde{X}_4 - \tilde{X}_{11}$ – мигрирующие. При

номинальной нагрузке оценка кумулятивного вклада демонстрирует рост слабостационарной категории от 0,181% в нормальном состоянии до 0,214% при ослаблении креплений ПП+ЗП. Для мигрирующей категории кумулятивный вклад изменяется от 0,098% до 0,133%. Необходимо отметить, что первые две компоненты, формирующие сигнал, \tilde{X}_0 и \tilde{X}_1 , изначально описывают более 99,5% от общего сигнала, поэтому оценка производится в узком коридоре значений.

В режиме холостого хода кумулятивный вклад слабостационарной категории постепенно растет от 0,178% в нормальном состоянии до 0,188% при ослаблении креплений ПП+ЗП, а вклад основной группы компонент \tilde{X}_0 и \tilde{X}_1 уменьшается от 99,746% до 99,605%. Кумулятивный вклад мигрирующей категории проявляется в большей степени и растет от 0,068% до 0,188% или 2,782 раза (рисунки 3.26-27). Как и в предыдущем разделе, при пофазном анализе ярче проявляется вклад эксперимента с ослаблением крепления ПЛ.

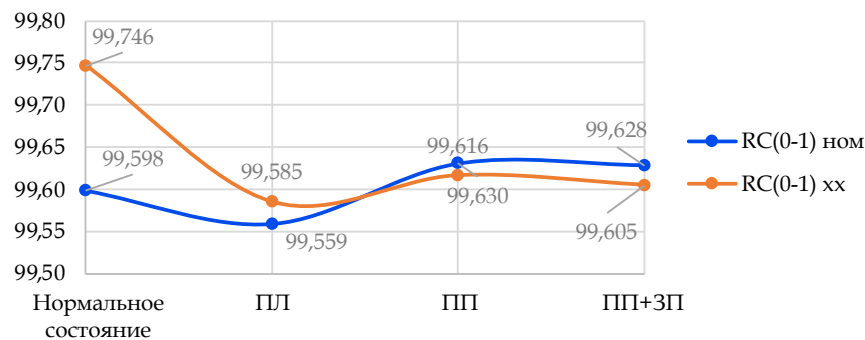


Рисунок 3.26 – Изменение суммарного вклада трендовых компонент, формирующий сигнал,

$RC(\tilde{X}_{0-1})$ в разных режимах нагрузки на валу АД

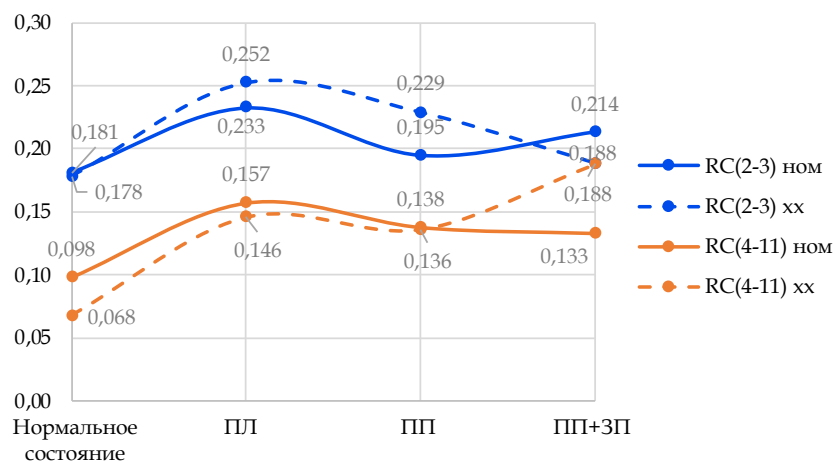
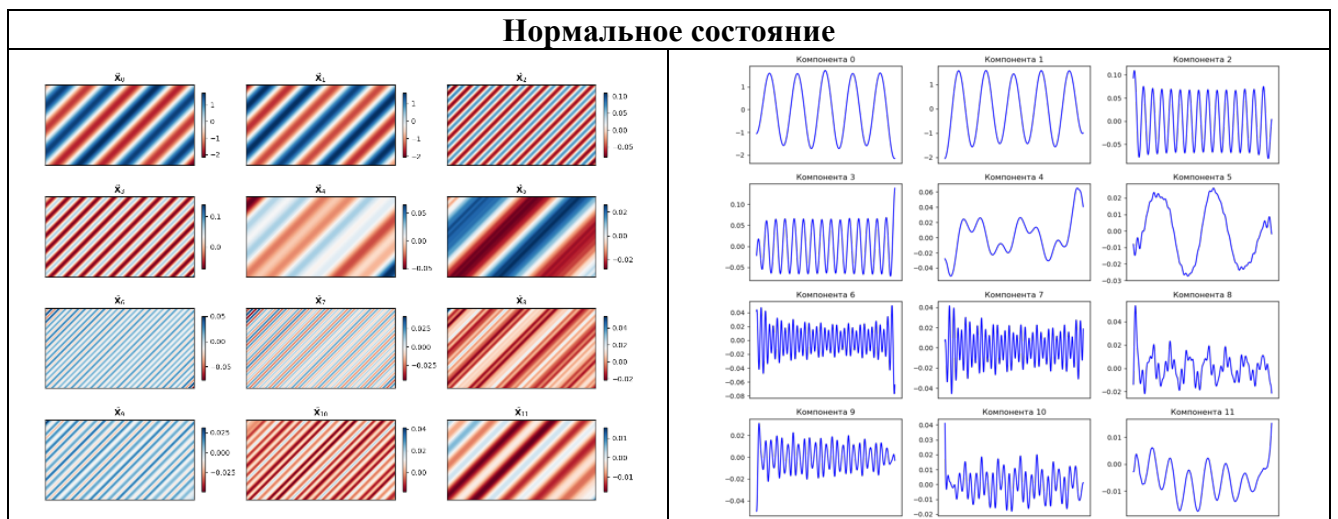


Рисунок 3.27 – Изменение суммарного вклада слабостационарных $RC(\tilde{X}_{2-3})$ и мигрирующих

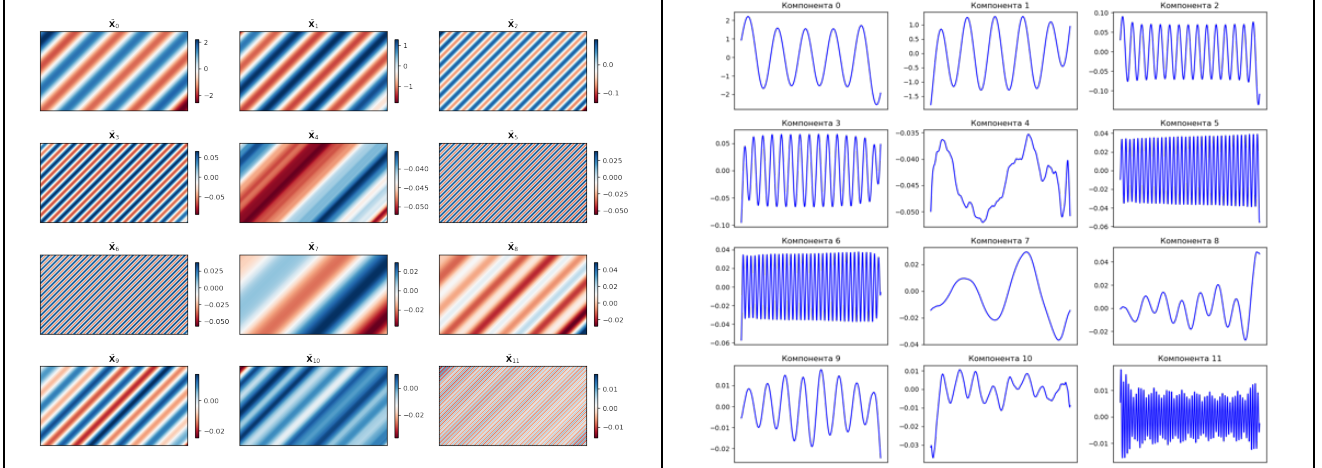
$RC(\tilde{X}_{4-11})$ компонент в разных режимах нагрузки на валу АД

Отдельно можно проследить развитие компоненты \tilde{X}_4 : во всех рассматриваемых состояниях с ослаблением креплений данная компонента выделяется в индивидуальную группу по результатам группировки. Вклад данной компоненты при номинальной нагрузке ступенчато изменяется от 0,056% при ослаблении крепления ПЛ до 0,044% при ослаблении крепления ПП и до 0,042% при ослаблении креплений ПП+ЗП. При визуальном анализе компонентного состава (таблица 3.13) можно увидеть усиление амплитуды колебаний данной компоненты. В режиме холостого хода наблюдается аналогичное развитие компоненты \tilde{X}_4 с колебанием вклада от 0,053% при ослаблении крепления ПЛ до 0,038% при ослаблении крепления ПП и до 0,046% при ослаблении креплений ПП+ЗП. Однако при визуальном анализе компонентного состава (таблица 3.14) можно предположить миграцию компоненты \tilde{X}_4 на позицию 5, при этом, результаты группировки при ослаблении креплений ПП+ЗП выделяют компоненты $\tilde{X}_4 - \tilde{X}_6$ в совместную группу. В данном эксперименте за проявление дефекта отвечает структура компоненты \tilde{X}_4 . Результаты полного расчета вкладов компонент при пофазном анализе для экспериментов типа «несоосность» и «ослабление креплений», а также результаты группировки методом иерархической кластеризации приведены в Приложении А и Б соответственно.

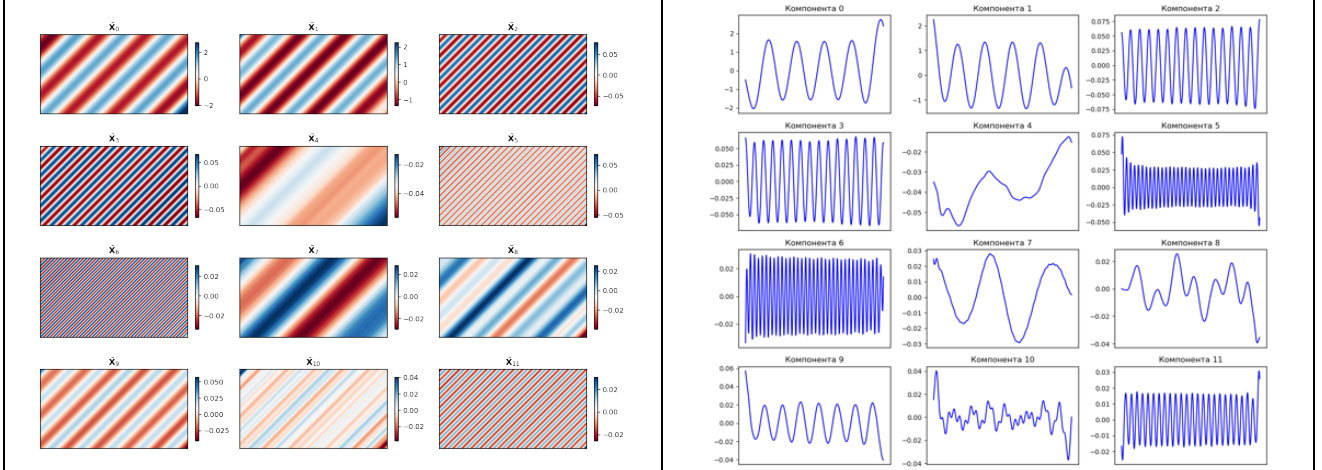
Таблица 3.13 – Сравнение результатов процедуры разложения и восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа по фазам тока АД для эксперимента «ослабление креплений» при номинальной нагрузке (фаза А)



Ослабление креплений (ПЛ)



Ослабление креплений (ПП)



Ослабление креплений (ПП+ЗП)

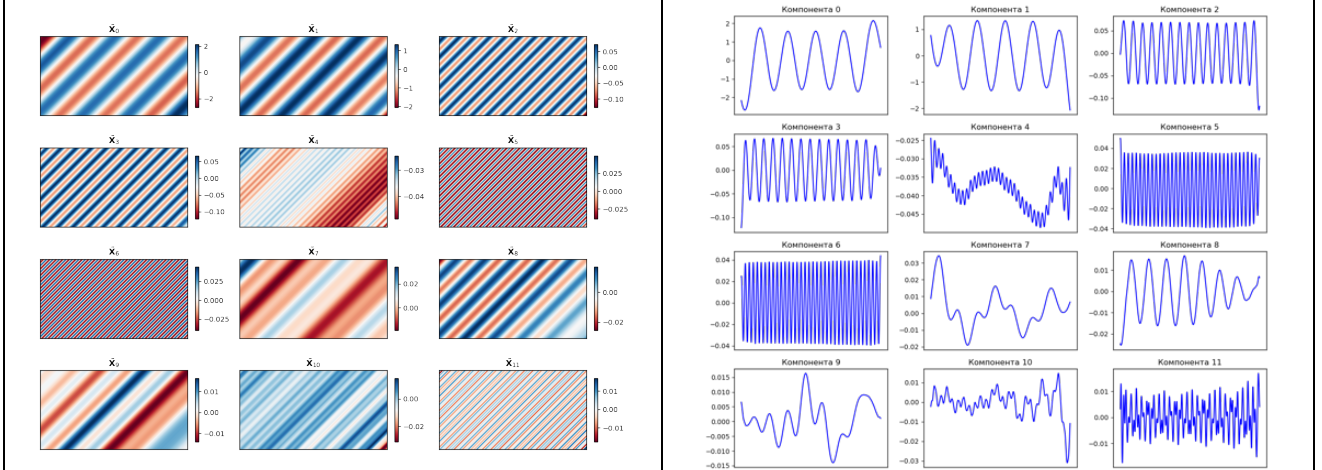
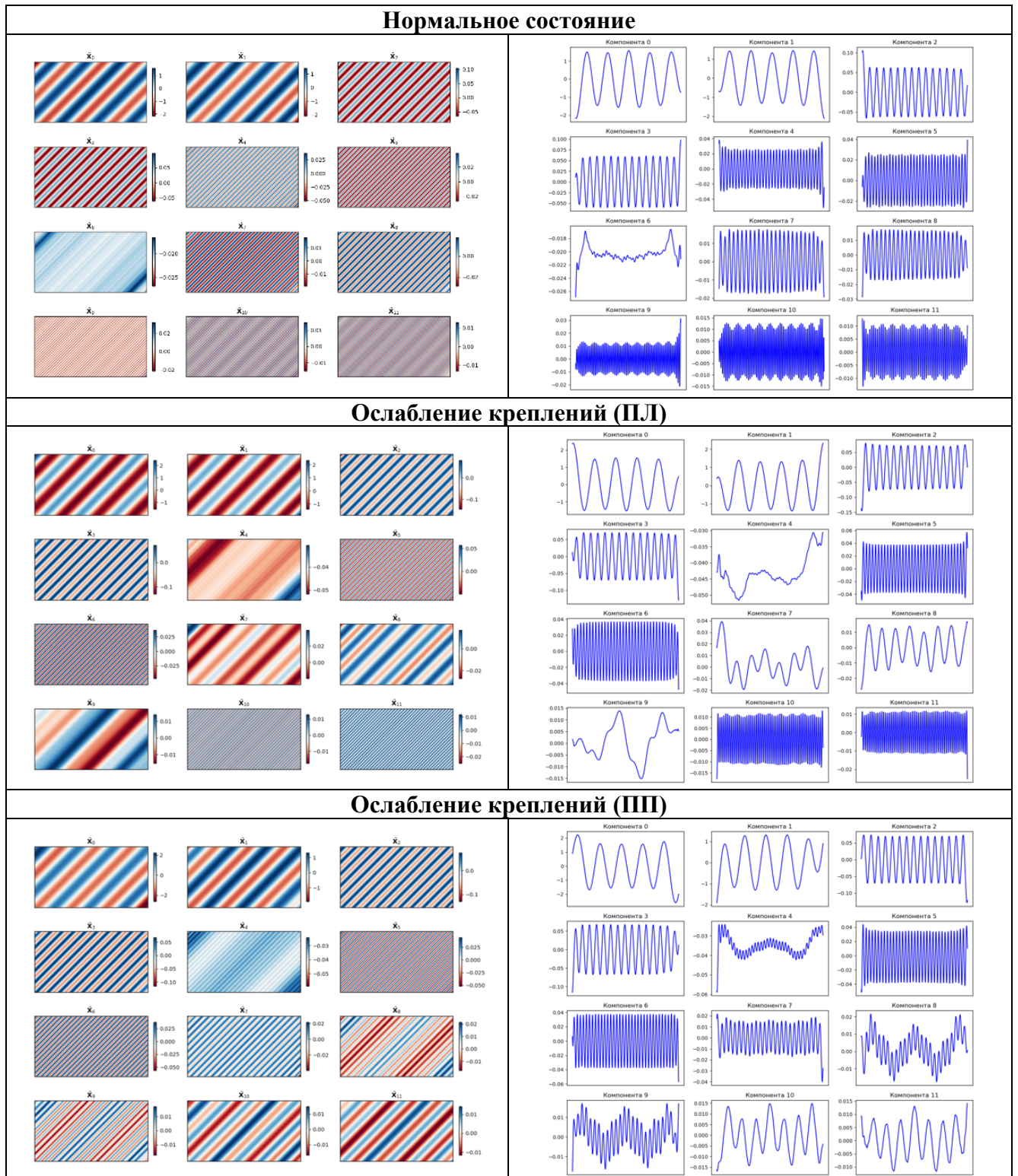
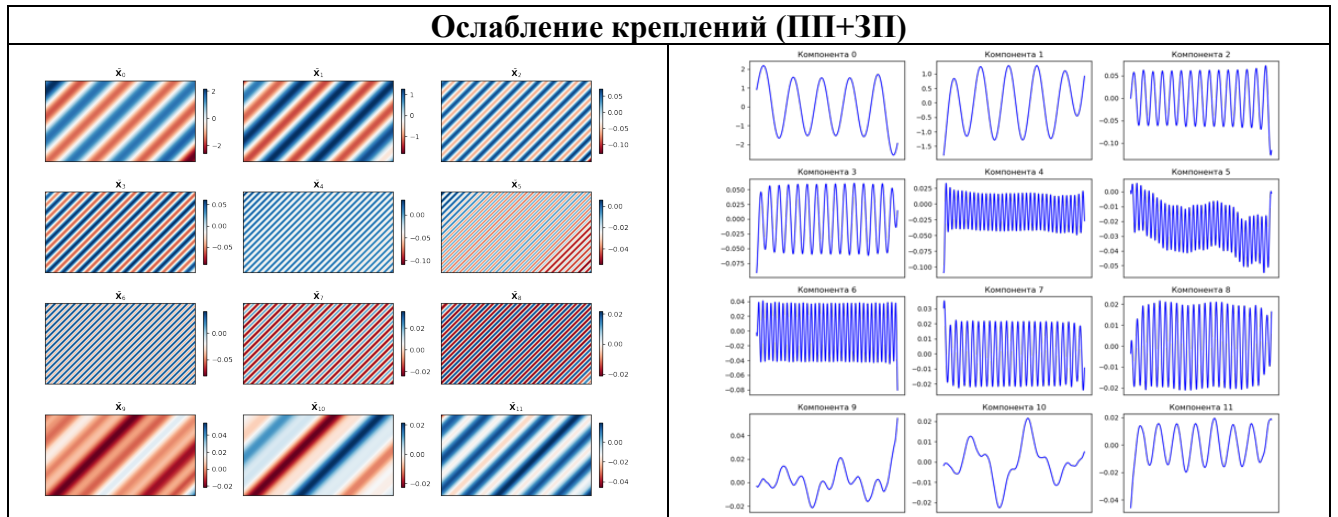


Таблица 3.14 – Сравнение результатов процедуры разложения и восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа по фазам тока АД для эксперимента «ослабление креплений» в режиме холостого хода (фаза А)



Продолжение Таблицы 3.14



3.4.2. Исследование механического ослабления креплений методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД

Результаты расчета относительного вклада для проведенных экспериментов типа «ослабление креплений» представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Результаты расчета относительного вклада компонент

X_i	Номинальная нагрузка				X_i	Режим холостого хода			
	Нормальное состояние	ПЛ	ПП	ПП+ЗП		Нормальное состояние	ПЛ	ПП	ПП+ЗП
0	94,819	88,717	87,997	84,005	0	76,518	75,776	77,068	77,517
1	0,977	3,053	3,760	5,000	1	7,838	5,513	5,747	6,590
2	0,975	3,051	3,756	4,996	2	7,834	5,508	5,742	6,583
3	0,472	1,570	1,261	1,736	3	2,985	4,471	3,485	2,060
4	0,470	1,568	1,260	1,733	4	2,984	4,467	3,482	2,058
5	0,255	0,282	0,363	0,631	5	0,369	1,038	1,467	1,780
6	0,254	0,281	0,363	0,630	6	0,369	1,037	1,466	1,779
7	0,150	0,159	0,204	0,174	7	0,353	0,587	0,423	0,343
8	0,149	0,157	0,197	0,174	8	0,353	0,587	0,423	0,343
9	0,015	0,135	0,104	0,086	9	0,055	0,201	0,110	0,259
10	0,015	0,131	0,103	0,083	10	0,055	0,198	0,106	0,253
11	0,013	0,088	0,069	0,051	11	0,039	0,130	0,076	0,075

При оценке результатов отчетливо прослеживается миграция компонент; например (таблица 3.16), при ослаблении креплений с левой стороны при номинальной нагрузке группы 1 и 2 ($\tilde{X}_1 - \tilde{X}_4$) меняются местами. В целом, при остальных дефектах и режимах наблюдается периодическая перестановка

последующих групп ($\tilde{X}_5 - \tilde{X}_{11}$). Определим $\tilde{X}_1 - \tilde{X}_4$ как слабостационарные, а $\tilde{X}_5 - \tilde{X}_{11}$ – мигрирующие.

При номинальной нагрузке оценка кумулятивного вклада показывает постепенный рост слабостационарной категории от 2,894% в нормальном состоянии до 13,465% при ослаблении креплений ПП+ЗП или в 4,65 раза. Для мигрирующей категории кумулятивный вклад изменяется от 0,851% до 1,828% или в 2,15 раза. Вклад основной компоненты, формирующей сигнал \tilde{X}_0 , при этом, падает на 10,814%. В режиме холостого хода снова наблюдается обратная ситуация: кумулятивный вклад слабостационарной категории постепенно уменьшается от 21,641% в нормальном состоянии до 17,291% при ослаблении креплений ПП+ЗП, а вклад основной компоненты \tilde{X}_0 увеличивается от 76,518% до 77,517%. Кумулятивный вклад мигрирующей категории растет от 1,593% до 4,832% или в 3,03 раза (рисунки 3.28-29).

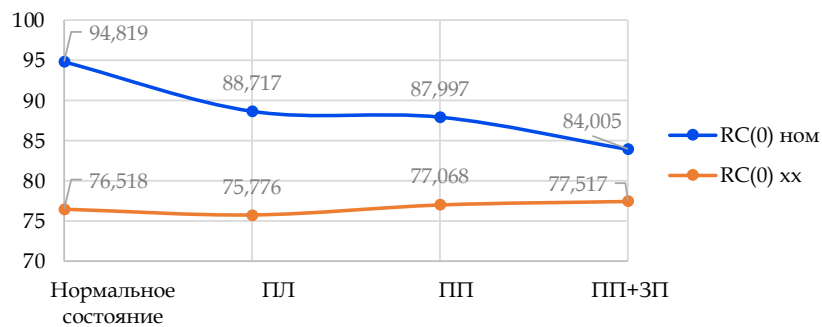


Рисунок 3.28 – Изменение суммарного вклада трендовой компоненты, формирующей сигнал, $RC(\tilde{X}_0)$ в разных режимах нагрузки на валу АД

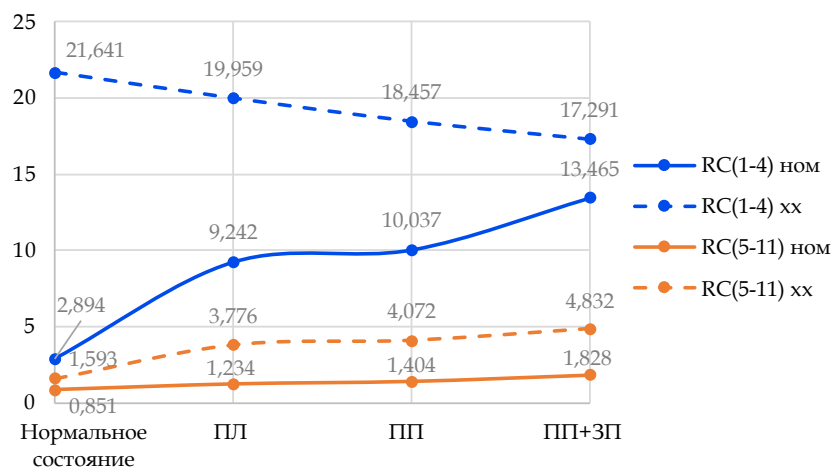
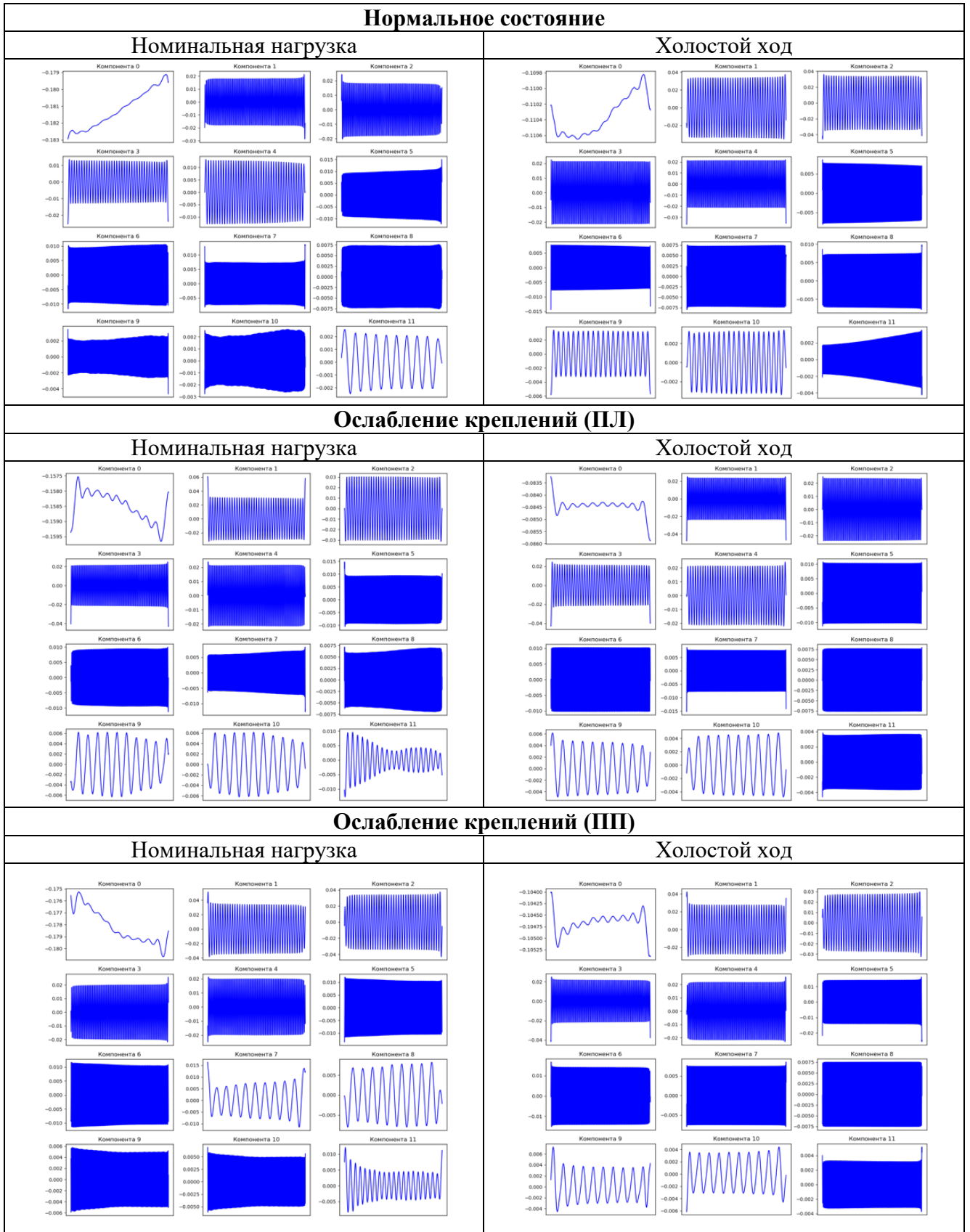
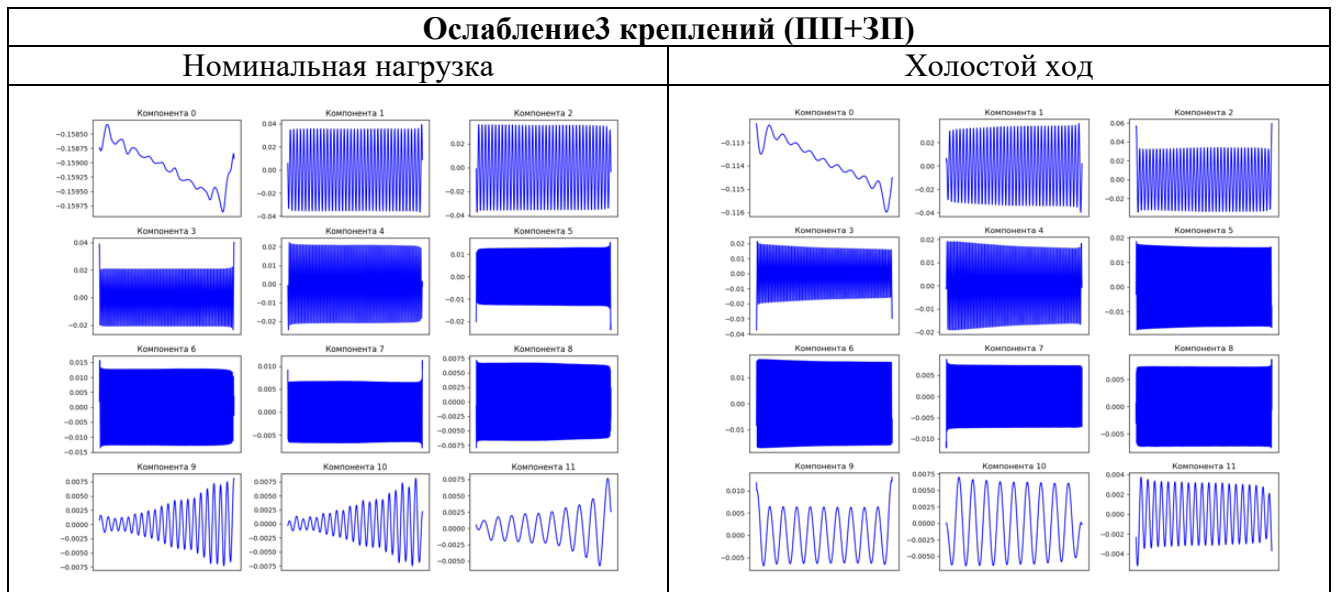


Рисунок 3.29 – Изменение суммарного вклада слабостационарных $RC(\tilde{X}_{1-4})$ и мигрирующих $RC(\tilde{X}_{5-11})$ компонент в разных режимах нагрузки на валу АД

Таблица 3.16 – Сравнение результатов процедуры восстановления компонент методом сингулярного спектрального анализа модуля обобщенного тока АД для эксперимента «ослабление креплений» в разных режимах нагрузки на валу АД



Продолжение Таблицы 3.16



В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено: совместный попарный анализ изменений в категориях позволяет установить начало появления дефекта и определить место его возникновения на ранней стадии.

По результатам анализа компонентного состава можно отметить наличие пересечений при проявлениях компонент в обеих экспериментальных группах типа «несоосность» и «ослабление креплений», а также общую схожесть структуры компонент, что подтверждает принадлежность к одному двигателю АИР80В4. Компонентный состав в эксперименте с подшипниками выполнен при помощи двигателя АИР132М4 и однозначно отличается. Это подтверждает необходимость создания компонентных диагностических карт для выявления изменений в работе электромеханического оборудования, которые будут индивидуальны для каждой машины.

3.5 Оценка чувствительности метода сингулярного разложения относительно спектрального анализа тока на основе быстрого преобразования Фурье

Полученные результаты отслеживания проявлений дефектов разного типа на основе проведенных экспериментов были сопоставлены с результатами обработки одним из классических методов.

Традиционно используемый для целей обработки сигналов аппарат непрерывного преобразования Фурье позволяет перейти от временного представления функции к частотному, что в ряде случаев позволяет выявить различные виды повреждений. При токовой диагностике поврежденный узел механизма определяют по росту амплитуды на определенной частоте – таким образом, различным повреждениям соответствуют различные диагностические частоты в спектре сигнала (ГОСТ ISO 20958-2015) [13].

Рассмотрим метод более подробно. Пусть $f(t)$ – непрерывная и монотонная функция времени, для которой выполняется условие (3.2):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < \infty. \quad (3.2)$$

Пусть функция $f(t)$ периодическая, то есть $f(t) = f(t + T \cdot n)$, где T – период;

n – целое число.

В этом случае функцию $f(t)$ можно разложить в ряд Фурье согласно формуле (3.3):

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t + \phi_k\right), \quad (3.3)$$

где A_k – амплитуда;

ϕ_k – фаза k -й гармоники;

k – целое число.

С использованием формулы (3.3) можно представить сигнал в виде суммы гармонических составляющих с частотами, кратными периоду сигнала.

Переходя к непрерывному преобразованию Фурье, можно записать (3.4):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3.4)$$

При использовании формулы (3.4) получаем вместо непрерывной функции времени $f(t)$ (временное представление сигнала) непрерывную функцию частоты $F(\omega)$ – частотное представление сигнала. Максимумы функции $F(\omega)$ соответствуют отдельным гармоническим составляющим исходного сигнала.

Как видно из формулы (3.4), она применима только для сигналов, определенных на всем протяжении оси времени. Анализ формулы показывает, что сигналам бесконечной длительности соответствуют узкие области спектра (например, синусоидальный сигнал имеет спектр, состоящий из всего одной линии), а кратковременные сигналы имеют весьма широкий спектр.

Для нестационарных сигналов спектр изменяется во времени, следовательно, формула (3.4) для них не применима. В этом случае используют так называемое оконное преобразование Фурье (ОПФ). Формула для спектра в этом случае имеет вид:

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt, \quad (3.5)$$

где $w(t - \tau)$ – оконная функция (ОФ);

τ – сдвиг во времени.

Спектральная функция в этом случае является функцией двух переменных – частоты и времени. Оконное преобразование Фурье производится для отдельных фрагментов функции, причем при сдвиге оконной функции во времени вид спектра изменяется. В результате спектр представляет собой поверхность в координатах ω и τ . Такое преобразование позволяет анализировать нестационарные сигналы, однако локальные особенности оценить сложно, так как локальные особенности сигнала (например, локальный экстремум) вызывают появление в спектре большого числа гармонических составляющих. Кроме того, выбор вида оконной функции не однозначен и требует априорной информации о виде анализируемого нестационарного сигнала.

Для выделения частотных составляющих, соответствующих дефектам, применяют быстрое преобразование Фурье (БПФ), разложение регистрируемого сигнала в сумму гармонических сигналов с характерной амплитудой, частотой и фазой (3.6). В составе спектра сопоставляют выявленные частотные составляющие с расчетными по конструктивным параметрам электродвигателя [145].

$$x(t) = \sum_{n=1}^N X_n e^{\sigma_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n). \quad (3.6)$$

Выделение характерных частот спектров фазных токов и модуля обобщенного тока, определяемых по расчетным и паспортным параметрам [85]:

Дефект внутреннего / внешнего кольца (3.7):

$$f = \frac{n}{2} f_r \left[1 \pm \frac{b_d}{d_p} \cos \beta \right]. \quad (3.7)$$

Дефект шарика (3.8):

$$f = \frac{d_p}{2b_d} f_r \left[1 - \left(\frac{b_d}{d_p} \cos \beta \right)^2 \right]. \quad (3.8)$$

Дефект дорожки (3.9):

$$\frac{f_r}{2} \left[1 - \frac{b_d}{d_p} \cos \beta \right]. \quad (3.9)$$

Несоосность* (3.10):

$$kf + n f_r, \quad \text{где } k, n = [1, 2, \dots], \quad (3.10)$$

где f_r – частота вращения ротора электродвигателя;

n – число шариков в подшипнике;

β – угол контакта шариков;

b_d – диаметр тел качения;

d_p – диаметр окружности центров шариков.

*Для дефекта типа «несоосность» можно принять частоту, кратную частоте вращения ротора.

В качестве примера, на рисунках 3.30, 3.31 представлены спектры модуля обобщенного тока и фазного тока соответственно, выполненные методом быстрого преобразования Фурье, для дефекта типа «несоосность».

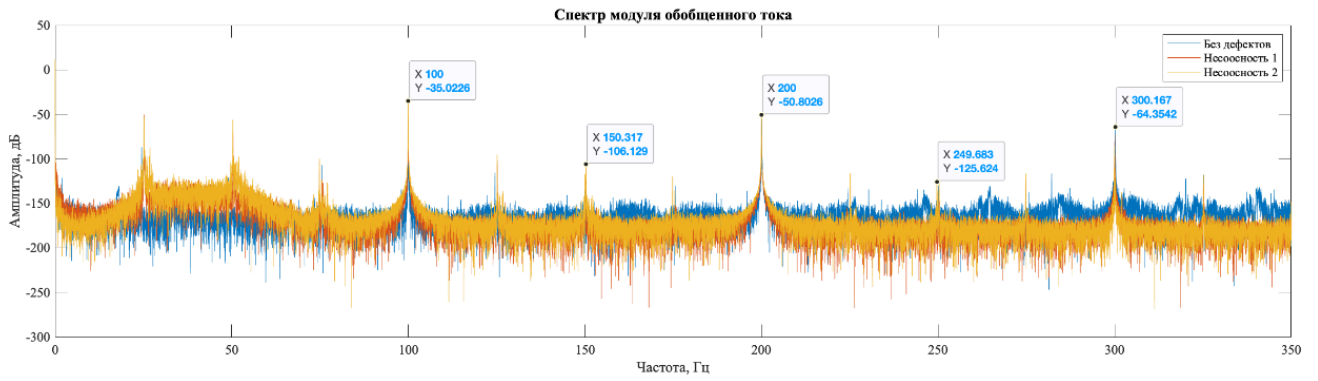


Рисунок 3.30 – Спектр модуля обобщенного тока – обнаружение дефекта типа «несоосность»

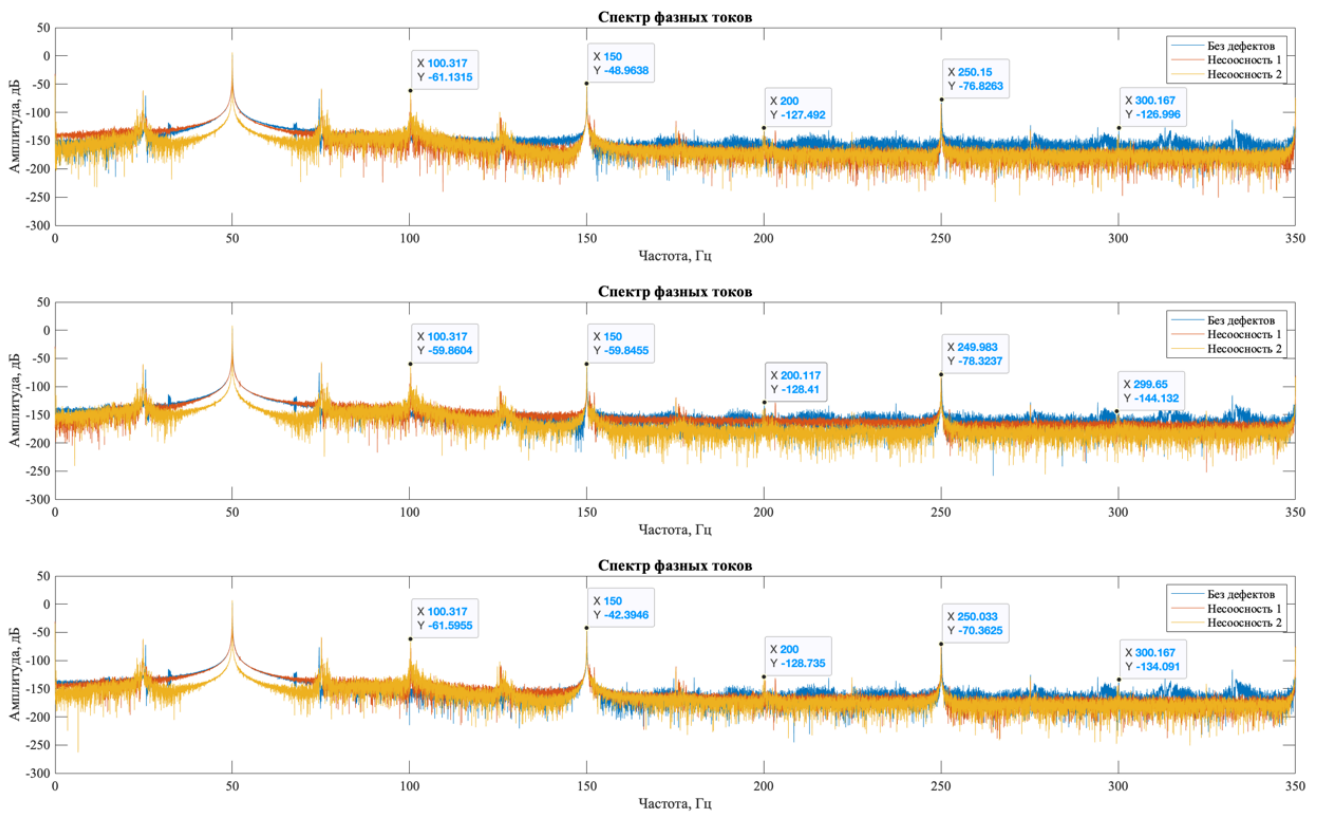


Рисунок 3.31 – Спектры фазных токов статора – обнаружение дефекта типа «несоосность»

Сравнение полученных результатов по обнаружению развивающихся дефектов по поставленным экспериментам методами БПФ и SSA представлены в таблицах 3.17. – 3.20.

Таблица 3.17 – Результаты сравнения полученных амплитуд на расчетных частотах для двигателя АИР132М4

Состояние		$M_{НОМ}$	
Нормальное	f_d	180	255
	A, дБ	-133,643	-63,7
Раковины (1)	f_d	180	255
	A, дБ	-128,516	-52,2

Продолжение Таблицы 3.17

Раковины (3)	f_d	180	255
	А, дБ	-131,429	-55,9
Цветовые метки:		Определение дефекта не представляется возможным	
		Наблюдается изменение системы	
		Дефект определен	

Таблица 3.18 – Результаты идентификации наличия дефектов методом сингулярного анализа для двигателя АИР132М4

Состояние	$M_{\text{НОМ}}$
Нормальное	-
Раковины (1)	$RC(X_i)$
Раковины (3)	$RC(X_i)$

Таблица 3.19 – Результаты сравнения полученных амплитуд на расчетных частотах для двигателя АИР80В4

Состояние		$M_{\text{НОМ}}$					X.X.				
		f_d	97	146	194	242	291	100	150	200	250
Нормальное	f_d	97	146	194	242	291	100	150	200	250	300
	А, дБ	-89,5	-59,4	-136	-85,5	-127	-121	-52,5	-132	-76,8	-126
Несоосность (1ст)	f_d	97	146	194	242	291	100	150	200	250	300
	А, дБ	-88,8	-53,5	-136	-76	-151	-77,2	-48,3	-133	-84,4	-146
Несоосность (2ст)	f_d	97	146	194	242	291	100	150	200	250	300
	А, дБ	-74,1	-52,3	-155	-76,2	-152	-61,1	-49	-127	-85,8	-139
Ослабление креплений	ПП	-	ПЛ	-	ПП+ЗП	-	ПЛ+ЗЛ	-			

Таблица 3.20 – Результаты идентификации наличия дефектов методом сингулярного анализа для двигателя АИР80В4

Состояние	$M_{\text{НОМ}}$	X.X.
Нормальное	-	-
Несоосность (1ст)	$RC(G_i)$	$RC(G_i)$
Несоосность (2ст)	$RC(G_i)$	$RC(G_i)$
Ослабление креплений		
ПП	$RC(C_i)$	$RC(C_i)$
ПЛ	$RC(C_i)$	$RC(C_i)$
ПП+ЗП	$RC(C_i)$	$RC(C_i)$

Сравнительный анализ показал превосходство предлагаемой методики на основе сингулярного разложения относительно Фурье-анализа. Однако имеются некоторые ограничения: как и при использовании других методик, для однозначного заключения об обнаружении дефекта в момент времени t необходимо знание о предыдущем состоянии системы.

3.6 Выводы по главе 3

1. По результатам проведенных исследований предложены новые признаки выделяемых компоненты по свойству стационарности: стационарные, слабостационарные, мигрирующие;

2. Обосновано применение метода группировки на основе иерархической кластеризации, который по сравнению с визуальным методом группировки и методом на основе скаттерограмм демонстрирует эффективность вычислительную и при выделении компонент;

3. На основе экспериментальных исследований установлено: разработанный алгоритм выявления дефектов по электрическим параметрам на основе сингулярного разложения позволяет провести декомпозицию сигнала и, по результатам группировки компонент на основе выявления уровня и миграции компонент, установить наличие дефекта на начальной стадии развития;

4. При сравнительной оценке установлено, что методы, основанные на спектральном анализе тока (БПФ) не позволяют выявить повреждения на начальной стадии и однозначно дать информацию о наличии дефекта и его изменении. Сравнительный анализ показал превосходство предлагаемой методики на основе сингулярного разложения относительно Фурье-анализа;

5. Установлены зависимости изменения уровня вклада компонент при разложении фазных токов и обобщенного тока от уровня изменения дефектов асинхронного двигателя. Выявлено, что рост уровня вклада компонент, соотносящихся с наличием и развитием дефекта, соответствует росту потерь мощности, обусловленных наличием дефекта.

6. Наличие исследовательского инструмента, основанного на подходах, представленных в работе, способствует обнаружению наличия раннего зарождения изменений в режиме эксплуатации. Можно выделить несколько аспектов, в которых будут интересны дополнительные исследования:

- в части анализа результатов – группировки разными способами для проверки гипотезы декомпозиции и взаимной корреляции при наличии других типов повреждений, комбинаций типов и уровней повреждений;

- понижение разрядности данных до уровня, когда способ группировки на основе скаттерограмм потеряет свое свойство обнаружения начальной и развитой стадии дефекта;
- создание полноценной сингулярной компонентной диагностической карты с использованием представленных подходов для индивидуального электромеханического оборудования;
- переход к распознаванию влияния сопряженного оборудования, исключению влияния гармонических искажений на результаты дифференциации дефектов в сингулярных компонентных диагностических картах АД и как следствие – обнаружению причин появления дефекта;
- совершенствование экспериментальной базы с целью возможности сравнения полученных результатов с методами, основанными на сигналах вибрации, и оценкой нагрузок, воспринимаемых подшипником.

ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ АД

4.1 Системы управления ТОиР в условиях цифровизации

4.1.1. Особенности ТОиР насосных систем

Рост эксплуатационных расходов и затрат на ТОиР насосных систем определяется необходимостью повышения надежности, сокращением времени простоя и снижения экономического ущерба по причине аварий, что вызывает необходимость выявления причин износа и определения его скорости.

Как правило, время простоя и стоимость обслуживания увеличиваются по причине отсутствия необходимых деталей для замены и / или ремонта оборудования. Простой единицы оборудования даже на небольшом предприятии может нанести убытки в до 20 тыс. долл. в день [146]. Однако проведение дополнительного аудита и внедрение цифровых систем снижает затраты на ремонт и недополученную прибыль вследствие простоя оборудования и т.д. [68]

Проведение ТОиР определяется по документации завода-изготовителя насоса. Любые изменения в работе насосного оборудования (появление шума, резкие изменения температуры подшипников, утечка из уплотнительной камеры или насоса) должны немедленно фиксироваться и передаваться оператору для принятия решений о дополнительной проверке.

4.1.2. Системы управления ТОиР в условиях НГП

Для обеспечения надежной работы систем электропривода на предприятиях ТЭК и МСК преимущественно используются традиционные методы обнаружения дефектов, основанные на периодическом техническом обслуживании и ремонте оборудования, а также на применении средств технической диагностики:

- по времени (межремонтный цикл задан как календарный промежуток, который зависит от конкретного предприятия, эксплуатирующего АД, и слабо коррелирует с фактическим состоянием АД);

- по наработке (межремонтный интервал задан как определенная наработка: машино-часы, объем продукции, пробег и т.д.);
- по состоянию (очередной ремонт необходим при достижении определенных параметров).

Традиционные методы ТОиР, связанные с остановкой процесса, влекут за собой серьезные затраты, при этом аварийные ситуации, связанные с износом оборудования, приводят к еще большему ущербу [19, 29], что обуславливает переход к ТОиР оборудования по фактическому состоянию. Однако для этого требуется диагностическое оборудование, квалифицированный персонал, а также разработанные методики диагностики по диагностическим параметрам. Также анализ причин возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации технологического оборудования добывающих и транспортных предприятий нефтегазового сектора показывает, что при разработке основ обеспечения безопасной эксплуатации необходимо учитывать не только техническое состояние, но и нестационарность условий эксплуатации технологического оборудования и эксплуатационных рабочих параметров технологических процессов [5, 21, 30].

4.1.3. Тенденции в управлении ТОиР АД

На сегодняшний день критерием принятия решения о выводе АД в ремонт является достижение наблюдаемыми параметрами критических значений (ток, температура, вибрации), при этом не проводится оценка энергетических затрат, которые связаны с циклом эксплуатации. Однако в процессе эксплуатации помимо энергии, для высокоэффективных вращающихся электрических машин требуется большое количество природных ресурсов, таких как железо, медь, материалы с постоянными магнитами и другие полезные ископаемые, а также энергия, необходимая для извлечения, обработки, производства и распределения этих материалов. Оценка стоимости жизненного цикла (Life-Cycle Costing, LCC) — это метод экономической оценки, связанный со всеми этапами жизни оборудования от добычи и переработки материалов, производства, распределения, использования, ремонта и обслуживания, а также утилизации или переработки. Актуальным

является вопрос оценки воздействия на жизненный цикл этапов использования, ремонта и обслуживания поскольку на них суммарно выпадает до 95% всех энергетических затрат [21, 22, 23]. Электродвигатели, как правило, рассчитаны на срок службы 12–20 лет без капитального ремонта в условиях их нормальной эксплуатации. Потребность в энергии и экологические отходы, связанные с хранением и реализацией, включаются в стадию использования. На этом этапе особенно важна эффективность работы электродвигателя и его энергетические характеристики (раздел 1.4.3).

Цель оценки стоимости жизненного цикла – сравнить весь спектр затрат, отнесенных к оборудованию, путем количественной оценки всех исходных данных, потоков энергии и материалов для оценки того, как они влияют на затраты. Эта информация используется для совершенствования процессов и обеспечения надежной основы для принятия обоснованных решений, а также может быть использована для управления стратегиями эксплуатации, техническим обслуживанием и ремонтом.

Однако для создания надежной и эффективной модели стоимости жизненного цикла оборудования необходимо иметь инструменты, помогающие определить момент времени, когда оборудование требует замены на основании составленного заранее плана использования, в котором будет обозначена фаза снижения стоимости владения и увеличения эксплуатационных расходов [70, 118].

Стратегия ТОиР и корректное распределение времени обслуживания и ремонтов формируются с опорой на данные о периодичности возникновения повреждений и отказов АД. В данном направлении исследователями проведена большая работа: предложены методы оптимизации транспортировки [83, 129]; рассмотрены преимущества и приведены способы применения ИНС для прогнозирования времени межремонтных интервалов при проведении различных работ [78, 87, 110, 147, 152]; исследования также ведутся в области формирования оптимальной стратегии управления энергопотреблением [84, 103, 104, 122].

Развитие технологических комплексов и внедрение систем с высокой степенью автоматизации и реконфигурации производства [141], позволяют

оптимизировать программы ТОиР и сократить затраты на обслуживание. Таким образом, выполняется переход программ ТОиР от реактивного обслуживания (работа на отказ) и планово-предупредительной системы ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, а в последствии к предиктивному, когда выполняется организация ремонтов на основе знаний о дефектах отдельных узлов, и выявлении первопричин отказов (рисунок 4.1). Для этого метода необходимы средства, способные выявлять дефекты и с заданной вероятностью давать прогноз о продолжительности работоспособного состояния без вывода оборудования в ремонт.



Рисунок 4.1 – Этапы развития систем ТОиР электрооборудования (на основе [153])

Предиктивное обслуживание определяет действия по техническому обслуживанию и ремонту в соответствии с регулярными проверками физических параметров оборудования и моделей деградации, чтобы вмешаться в работу оборудования до отказа. В основе предиктивного обслуживания лежат данные, которые преобразуются из необработанных сигналов в полезную информацию для поддержки процесса принятия решений. Соответствующие параметры, такие как вибрации, акустическая эмиссия, токи, давление, температура и другие, контролируются, и в любой момент времени оценивается исправность системы на основе их исторических и текущих значений. Помимо этого, осуществляется прогноз поведения параметров для расчета остаточного ресурса и соответствующего планирования мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту. Этот процесс часто называют в литературе предсказательной аналитикой.

Данная стратегия состоит из четырех основных этапов: сбор данных, выделение признаков, диагностика и прогнозирование.

На сегодняшний день в России уровень интеграции цифровых и интеллектуальных методов анализа данных, рассмотренных в разделе 2.1, в системы обслуживания технического состояния оборудования остается достаточно низким, расходы на НИОКР в процентном отношении к ВВП РФ в течение десятилетнего периода практически не менялись и держались на уровне 1% [58].

4.2 Алгоритм воздействия на ТОиР АД

На основе раздела 4.1 предлагается алгоритм воздействия на план технического обслуживания и ремонта, базирующийся на алгоритме раннего обнаружения дефектов АД (раздел 2.5), и на предыдущих рассмотренных этапах, учитывающих миграцию и поступательную оценку вкладов компонент, их групп или категорий (рисунок 3.18). В алгоритме после этапа обнаружения дефекта следующим шагом предлагается внедрение классификатора для автоматического (без участия человека) определения вида и уровня потерь с целью корректировки кривой износа с учетом фактического вклада компонент и определения уровня развития дефекта (рисунок 4.2). Классификатор может базироваться на одном или нескольких классических алгоритмов машинного обучения, рассмотренных ранее в разделе 2.2, относится к техническим задачам, и далее в работе не рассматривается. Тем не менее, данный подход позволит сформировать условия изменения плана ТОиР, опираясь на фактическое состояние ЭД.

Далее будут рассмотрены возможные подходы к корректировке кривой износа на основе идентификации дефекта на ранней стадии развития и определения вклада компонентного состава и модель оценки стоимости жизненного цикла АД в целях создания системы принятия решению по воздействию на план ТОиР.

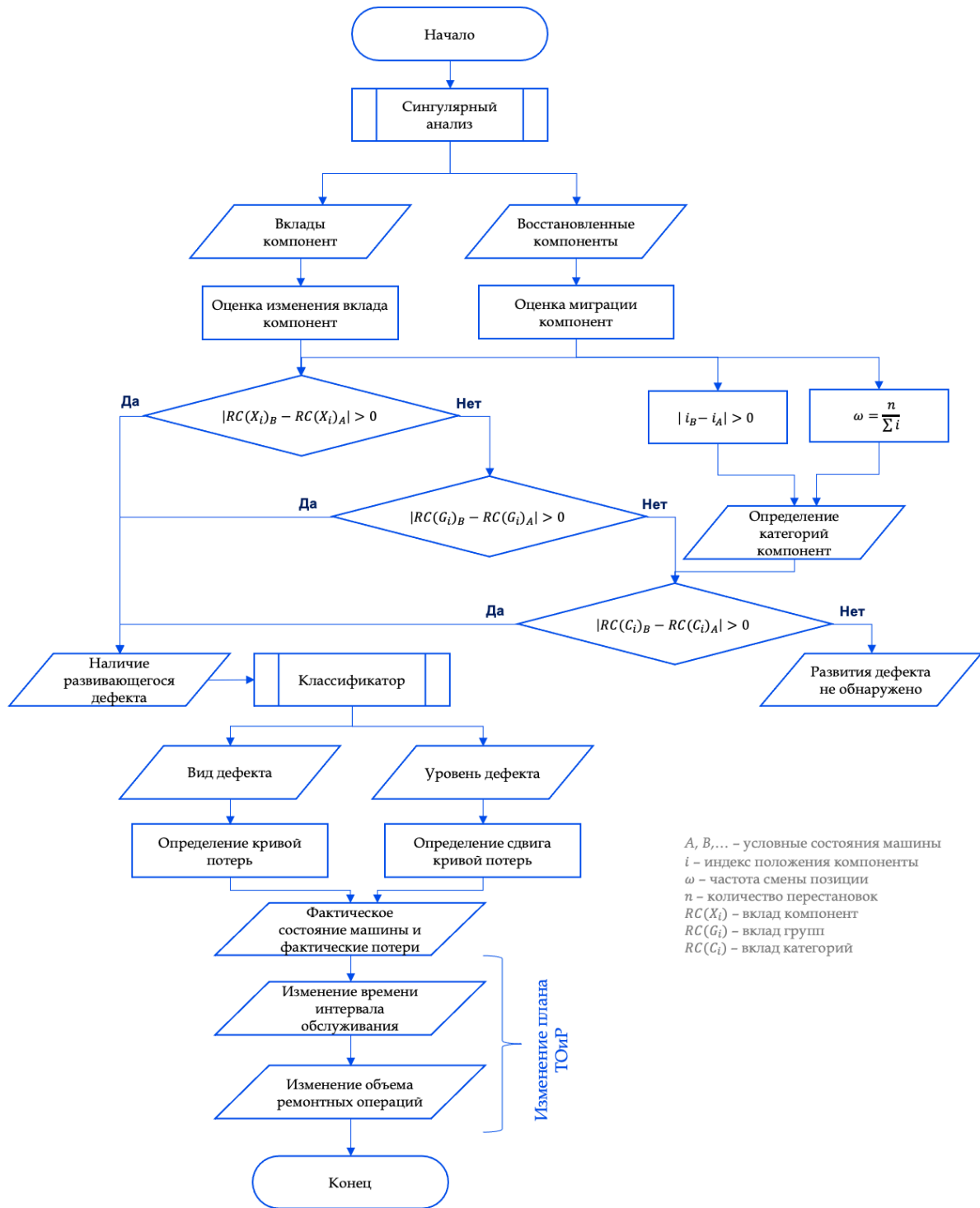


Рисунок 4.2 – Алгоритм воздействия на план технического обслуживания и ремонта

4.3 Определение потерь электроэнергии при изменении уровня дефекта

Оценка потерь электроэнергии может быть привязана к оборотам вала ротора и сравнению полученных значений с предыдущим и начальным состоянием. Для вычисления времени оборота вала асинхронной машины $t_{0.p.}$ требуется прямой или косвенный контроль частоты вращения ротора ω_r или угла положения ротора θ_r .

Вычисление изменения потерь активной мощности $\Delta W(t_{o.p.})$ в единицу времени, вызванных дефектом подшипника осуществляется по формуле (4.1):

$$\Delta W(t_{o.p.}) = \int_0^{t_{o.p.}} (p_{i+1}(t_{o.p.}) - p_i(t_{o.p.})) dt, \quad (4.1)$$

где $p_i(t_{o.p.})$ – мгновенная мощность i -го оборота вала ротора;

$t_{o.p.}$ – время оборота вала ротора.

Данный подход можно использовать при оценке потерь, связанных с деградацией подшипника, для сопоставления количества оборотов подшипника и потерь энергии, что может использоваться как оценка энергетического ресурса.

Однако при нескольких выявленных дефектах сопоставление потерь энергии и изменения компонент необходимо проводить на одном временном интервале, что приводит к изменению пределов интегрирования, сопоставимых с выборкой времени, которое используется для окна разложения тока. При этом определение мощности потерь электроэнергии усредняется за данный интервал времени.

Последовательность в данном случае выглядит следующим образом: в начале периода оценки эксплуатации, к примеру, на заведомо исправном двигателе, в течение выбранного диапазона времени при известном режиме нагрузки производится N измерений потребляемой мощности электропривода P_{1i} в интервале времени $\Delta t_i = \frac{T_{\text{инт}}}{N}$, где $T_{\text{инт}}$ – время, в течение которого проводились измерения, ч. Следует отметить, что чем меньше интервал времени Δt_i , тем выше достоверность измерений.

Далее определяется среднее значение потребляемой мощности электропривода \bar{P}_1 и производят оценку его стандартного отклонения $S_{\bar{P}_1}$ согласно формулам (4.2-4.4):

$$\bar{P}_1 = \sum_{i=1}^N \frac{P_{1i}}{N}, \quad (4.2)$$

$$S_{\bar{P}_1} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{P}_1 - P_{1i})^2}{N-1}}, \quad (4.3)$$

$$P_1 \in (P_{1max}, P_{1min}), \text{ где } \begin{aligned} P_{1min} &= \bar{P}_1 - 3 \cdot S_{\bar{P}_1} \\ P_{1max} &= \bar{P}_1 + 3 \cdot S_{\bar{P}_1}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Через интервалы времени $T_{\text{диаг}}$, производится измерение потребляемой мощности и определяются среднее \bar{P}'_1 , минимальное P'_{1min} , максимальное P'_{1max} значения потребляемой мощности в течение времени измерений. Затем определяется средняя величина коэффициента изменения потерь (4.5):

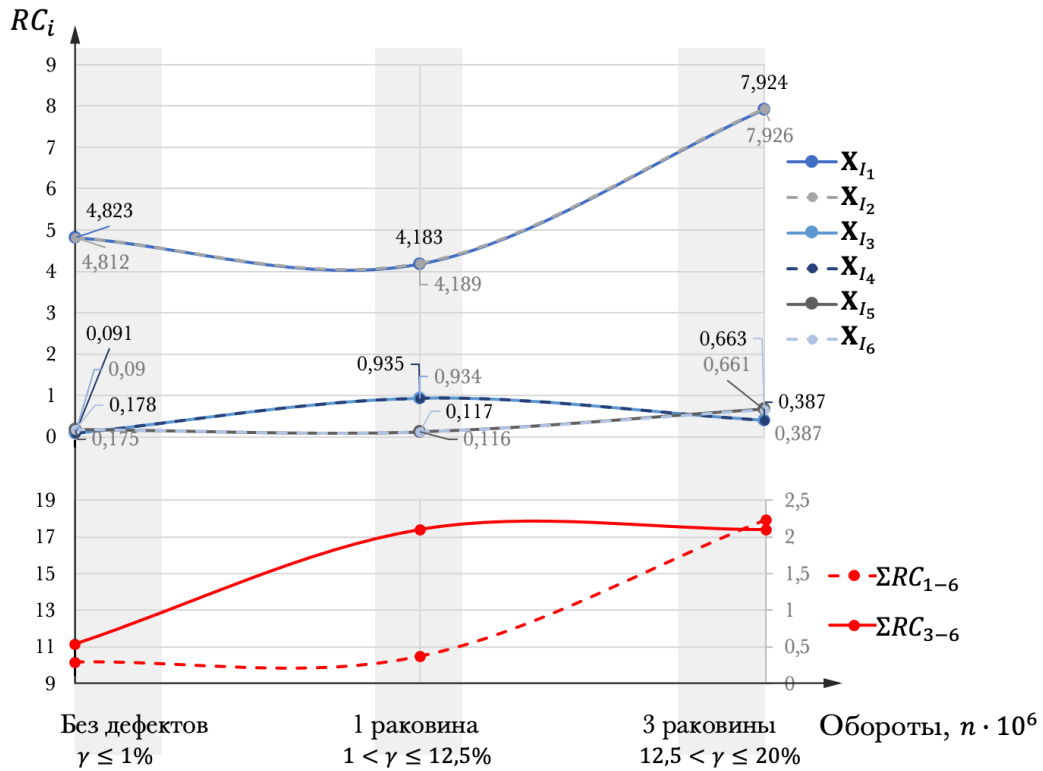
$$\Delta\rho_{\text{ср}} = \frac{\bar{P}'_1 - \bar{P}_1}{P_{1\text{ном}}}, \quad (4.5)$$

где $P_{1\text{ном}}$ – номинальное значение механической мощности электропривода, соответствующее данному режиму нагрузки, кВт. Величина коэффициента изменения потерь при минимальной и максимальной нагрузке определяются следующим образом (4.6):

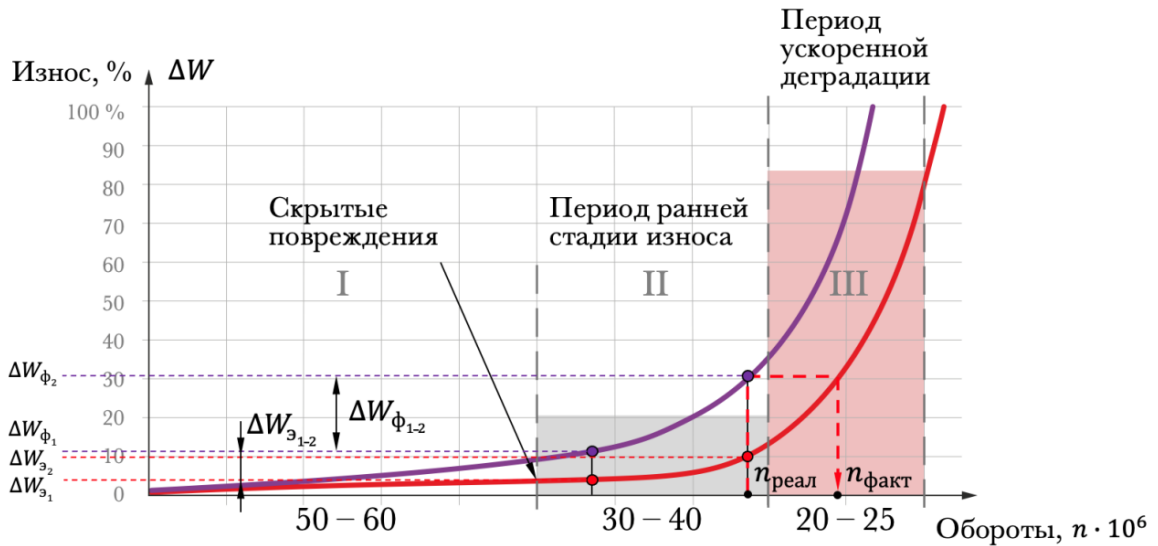
$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \frac{P'_{1min} - P_{1min}}{P_{1\text{ном}} \quad \text{min}} \\ \Delta\rho &= \frac{P'_{1max} - P_{1max}}{P_{1\text{ном}} \quad \text{max}}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Результаты оценки энергетических потерь и сопоставление вклада компонентного состава, который определяется по такой же последовательности при выявленных повреждениях (рисунок 4.3.а), могут быть использованы для выявления наличия дефекта на ранней стадии и корректировки кривой остаточного ресурса с учетом фактического состояния (рисунок 4.3.б). Отклонение от эталонной кривой возможно выявить уже на второй стадии – период раннего износа подшипника. Подсчет суммарных потерь на определенном этапе эксплуатации, которые обусловлены наличием дефекта, в последствии позволит

сформировать новые критерии, основанные на энергетической эффективности для интеллектуальных алгоритмов управления ТОиР.



а)



б)

Рисунок 4.3 – а) – изменения энергетических потерь в зависимости от уровня развития дефекта подшипника для опорных компонент $X_{I_1} - X_{I_6}$; б) – стадии развития дефекта подшипника: фиолетовый – фактическая кривая износа; красный – эталонная кривая износа

При выявлении новых компонент согласно способу, описанному в предыдущих разделах, сопоставление изменения вклада мигрирующих компонент по результатам периодических замеров позволяет использовать корреляционную

оценку, определить фактически сработанный ресурс (по времени или в оборотах) и оценить остаточный ресурс. При этом оценка потерь, связанных с дефектами, дает возможность определить точку нахождения на реальной кривой износа, а выявление компонент позволяет сопоставить с видом дефектов и уровнем его развития. Учитывая статистическое пополнение компонентных карт и совместную статистическую обработку последующих изменений потерь, компонентного состава и проводимых дефектаций оборудования, появляется возможность выявления уровня потерь, обусловленного различными видами дефектов для определенной марки оборудования.

При выявлении уровня потерь, обусловленного наличием дефектов, возможна экономическая оценка повреждения для управления планом ТОиР с учетом критерия энергетической эффективности. На рисунке 4.4 представлен расчет диапазона усредненной стоимости потерь на дефекты для двигателя $P_{ном} = 1,5$ кВт при стоимости электроэнергии 1,2 руб/кВт · ч. Очевидно, что исключение потерь электроэнергии на последней стадии ускоренной деградации покрывает стоимость ремонта, что необходимо учитывать при управлении планом ТОиР.

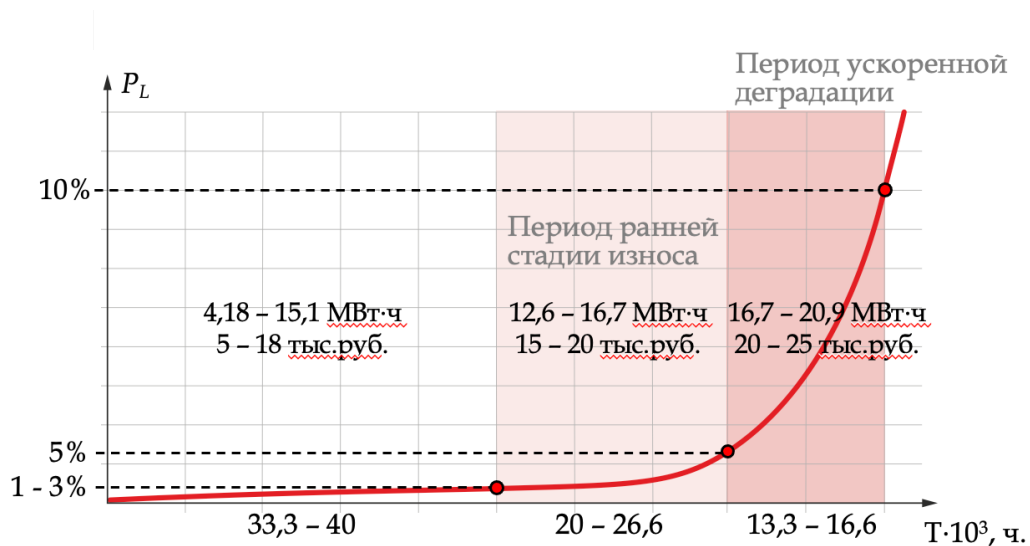


Рисунок 4.4 – Расчет усредненной стоимости потерь на дефекты для подшипника двигателя

$$P_{ном} = 1,5 \text{ кВт}, n = 1500 \text{ об/мин}$$

4.4 Модель оценки стоимости жизненного цикла АД с учетом выявленных потерь

Для построения системы принятия решения по воздействию на план ТОиР, предлагается модель оценки стоимости жизненного цикла. Необходимо отметить, что эффективность принятых решений по управлению ТОиР может рассматриваться только в долгосрочной перспективе, к концу срока службы двигателя, когда становятся очевидными статьи расходов на его обслуживание и дополнительные потери электроэнергии и убытки от возможного простоя оборудования. В литературе часто предлагается принятие решения об инвестициях в оборудование на основе оценки стоимости его жизненного цикла, и, хотя этот подход находит все больше откликов, еще нет широкой практики его применения.

Жизненный цикл двигателя в общем случае включает в себя 4 стадии: проектирование, производство, техническая эксплуатация и утилизация. Соответственно, управление стоимостью жизненного цикла предполагает снижение затрат на рассматриваемых стадиях при условии обеспечения работоспособности самого оборудования и сопряженного механического процесса с соответствующим выпуском продукции. Техническая эксплуатация – наиболее длительная стадия жизненного цикла и одновременно – самая дорогостоящая, поскольку включает потребление энергии на протяжении всего срока службы и меры по поддержанию работоспособности машины. Ввиду средней продолжительности срока службы асинхронных двигателей в нефтегазовой отрасли от 12 до 20 лет, необходимо в оценке стоимости жизненного цикла учитывать фактор временной стоимости денег и потенциальный рост стоимости электроэнергии.

Затраты на техническое обслуживание и ремонт электромеханического оборудования (раздел 1.1) составляют значительную часть общих эксплуатационных затрат предприятий. По мере выработки ресурса ЭМО общая доля затрат в процессе эксплуатации возрастает [28, 29].

Фактическое состояние двигателя и эффективность его работы определяются в основном условиями его работы (таблица 1.5). Следовательно, необходимо

учитывать механическую нагрузку и дополнительные потери, обусловленные наличием дефектов. Нагрузка определяет производственный план проведения работ по обслуживанию, потери – дельту времени, позволяющую сдвигать план.

Таким образом, для построения системы принятия решения по воздействию на план ТОиР, предлагается модель оценки стоимости жизненного цикла, учитывающая режим работы двигателя, потери, обусловленные нагрузкой, конструкционными особенностями и техническим состоянием, а также стоимость потребляемой электроэнергии на протяжении жизненного цикла и стоимость обслуживания машины (4.7):

$$LCC = -I - (E_M + E'_L) \cdot p_E \cdot k_{p1} - C_{MRO} \cdot k_{p2} - C_D + V_R, \quad (4.7)$$

где I – первоначальные инвестиции (первое допущение – покупка двигателя);

E_M – потребленная двигателем механическая энергия;

E'_L – потребленная двигателем электрическая энергия с учетом потерь, обусловленных наличием дефекта;

p_E – стоимость электроэнергии;

C_{MRO} – стоимость технического обслуживания и ремонта;

k_{p1}, k_{p2} – коэффициенты кумулятивной приведенной стоимости при изменении цены на электроэнергию и обслуживание соответственно;

C_D – стоимость вывода из эксплуатации;

V_R – прибыль от утилизации или последующей продажи; в модели принимается следующее допущение: $(C_D + V_R \approx 0)$ [73].

Необходимо отметить, что данная модель рассматривается и применяется только для случая продления срока эксплуатации и переносе планового ремонта на более поздний срок при определении фактического состояния (рисунок 4.2).

При моделировании в качестве рассматриваемого объекта выбрана магистральная нефтепроводная система, апробация методики выполнена на модельном ряде двигателей типа ВА мощностью от 0,37 до 90 кВт и частотой вращения 3000 об/мин (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Характеристики модельного ряда двигателей ВА в диапазоне от 0,37 до 90 кВт [47]

Модель	$P_{\text{ном}}$, кВт	$\eta_{\text{д}}$, %	$\cos \varphi$	n , об/мин
BA63A2	0,37	63,9	0,81	2800
BA63B2	0,55	74	0,82	2790
BA71A2	0,75	72,1	0,83	2825
BA71B2	1,1	75	0,84	2825
BA80A2	1,5	77,2	0,84	2840
BA80B2	2,2	79,7	0,85	2840
BA90L2	3	81,5	0,87	2870
BA100S2	4	83,1	0,88	2880
BA100L2	5,5	84,7	0,88	2900
BA112M2	7,5	86	0,88	2900
BA132M2	11	87,6	0,89	2930
BA160S2	15	88,7	0,89	2930
BA160M2	18,5	89,3	0,9	2930
BA180S2	22	89,9	0,9	2940
BA180M2	30	90,7	0,9	2950
BA200M2	37	91,2	0,9	2950
BA200L2	45	91,7	0,9	2960
BA225M2	55	92,1	0,9	2965
BA250S2	75	92,7	0,9	2970
BA250M2	90	93	0,91	2970

Расчет параметров модели производится следующим образом:

Первоначальные инвестиции (4.8)

$$I(P_{\text{ном}}) \approx (1 - d + k_A) \cdot C_{\text{д}}, \quad (4.8)$$

где d – ставка дисконтирования;

$k_A \approx 0,1$ – дополнительные затраты, пропорциональные закупочной цене;

$C_{\text{д}}$ – стоимость двигателя.

Стоимость двигателя по данным [50], указана в таблице 4.2:

Таблица 4.2 – Стоимость двигателей ВА

Модель	$C_{\text{д}}$, руб.	Модель	$C_{\text{д}}$, руб.
BA63A2	8 396	BA132M2	40 148
BA63B2	8 821	BA160S2	56 338
BA71A2	9 457	BA160M2	61 247
BA71B2	10 545	BA180S2	78 027
BA80A2	13 244	BA180M2	87 955

Продолжение Таблицы 4.2

BA80B2	14 095	BA200M2	104 193
BA90L2	17 477	BA200L2	114 085
BA100S2	20 663	BA225M2	134 699
BA100L2	23 631	BA250S2	178 564
BA112M2	28 095	BA250M2	190 087

Стоимость обслуживания (4.9-10)

$$C_{MRO} = (\text{Обслуживание в первый год}) + (\text{Остаток операций}) \cdot k_{p2}, \quad (4.9)$$

$$(\text{Обслуживание в первый год}) = (c_1 \cdot P_K + c'_1 \cdot P_T + c''_1 \cdot TO + c'''_1 \cdot ДК), \quad (4.10)$$

где $P_K, P_T, TO, ДК$ – количество операций по капитальному ремонту, текущему ремонту, техническому обслуживанию и диагностическому контролю соответственно в первый год обслуживания, определяется по РД предприятия;

$c_1 - c'''_1$ – стоимость операций.

Начальный объем работ по техническому обслуживанию и ремонту был определен на основании положения о системе технического обслуживания и ремонта электроустановок магистральных нефтепроводов РД 153-39ТН-009-96 [15].

Для электродвигателей насосов определяются следующие виды работ системы ТОиР: диагностический контроль (ДК) – оперативный и плановый; техническое обслуживание (ТО) – периодическое; ремонты текущий (P_T) и капитальный (P_K) – по техническому состоянию.

При условии постоянной эксплуатации двигателя, например, на объектах НПС, периодичность работ указана в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Периодичность технического обслуживания, диагностического контроля и ремонта электродвигателей магистральных и подпорных насосных агрегатов

Наименование оборудования	Периодичность, ч			
	ТО	Планового ДК	P_T	P_K
Электродвигатели асинхронные напряжением 0,4 кВ с частотой вращения:				
3000 об/мин	700 – 800	3500 – 4000	7000 – 8000	25000 – 26000

Для определения базового количества проводимых работ на жизненном цикле двигателя, необходимо знать средний срок службы машины. Средний срок службы указан в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Средняя продолжительность службы асинхронных двигателей в зависимости от мощности

Диапазон мощностей	0 – 11 кВт	11 – 110 кВт	110 – 370 кВт
Срок службы, лет	12	15	20

На основании таблиц 4.3 и 4.4 количество ремонтов для модельного ряда двигателей ВА будет определено следующим образом (таблица 4.5):

Таблица 4.5 – Количество работ системы ТОиР с учетом средней продолжительности службы рассматриваемых асинхронных двигателей

Срок службы	Виды работ			
	ДК	ТО	Р _Т	Р _К
	Количество работ			
12 лет	26 – 30	131 – 150	13 – 15	4 – 5
15 лет	33 – 38	164 – 188	16 – 19	4 – 5

Принимается следующее допущение: для работ по текущему и капитальному ремонту рассматривается проведение работы согласно периодичности, указанной в таблице 4.3., однако вид плана ТОиР может быть любой, это не влияет на саму последовательность выполнения расчетов.

В расчете принимается среднее значение числа работ, тогда распределение количества работ в первый год и на оставшийся период с учетом графика проведения работ, примет следующий вид (таблица 4.6):

Таблица 4.6 – Распределение работ системы ТОиР на жизненном цикле двигателей

Срок службы	Виды работ			
	ДК	ТО	Р _Т	Р _К
	Количество работ в первый год			
	2	11	1	0
	Остаток операций на протяжении жизненного цикла			
12 лет	26	130	13	4
15 лет	33	165	17	5

Согласно [151], соотношение стоимости проведения работ статистически соответствует следующему: $c_1''' = x, c_1'' = 15x, c_1' = 40x, c_1 = 300x$. На основании проведенного поиска и с учетом выполнения работ собственной ремонтной бригадой предприятия, зависимости стоимости двигателя и капитального ремонта от мощности для рассмотренного ряда двигателей типа ВА мощностью от 0,37 до 90 кВт примет следующий вид (рисунок 4.5):

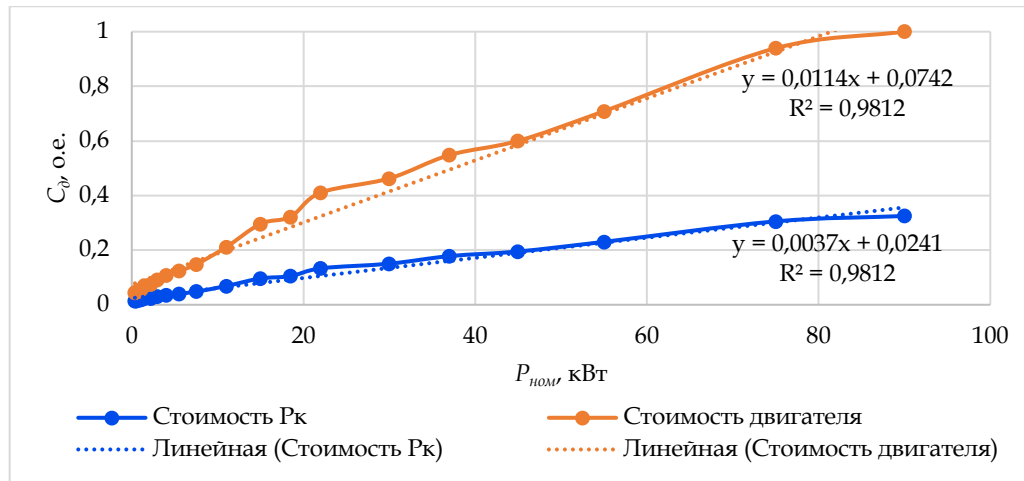


Рисунок 4.5 – Зависимости стоимости двигателя и капитального ремонта от мощности

Определение потерь

Определение вклада потерь на основе экспериментальных исследований при вариации нагрузки. Зная изменение нагрузки M , согласно упрощенной формуле Клосса [9] (4.11-4.14):

$$M = \frac{2M_{кр}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}, \quad (4.11)$$

$$M_{кр} = \lambda M_{ном}, \quad (4.12)$$

$$s_{кр} = s_{ном} \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right), \quad (4.13)$$

$$s = \frac{n - n_{ном}}{n}, \quad (4.14)$$

где $M_{кр}$ – критический момент, Н·м;

s – скольжение;

$s_{кр}$ – критическое скольжение;

λ – коэффициент отношения критического момента к номинальному и известен из паспортных данных двигателя;

n – частота вращения, об/мин.

Тогда отдаваемая двигателем мощность (4.15):

$$P_2 = \frac{n \cdot M}{9,55}. \quad (4.15)$$

Потребляемая мощность будет (4.16):

$$P_1 = P_2 / \eta, \quad (4.16)$$

где η – КПД двигателя.

Для нахождения КПД воспользуемся следующим выражением (4.17):

$$\eta = \frac{P_2}{U \cdot I \cdot \cos \varphi \sqrt{3}}, \quad (4.17)$$

где U – напряжение сети, В;

I – потребляемый ток и определяется по экспериментальным данным, А;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности асинхронного двигателя, %, который можно определить на основании аппроксимации значений коэффициента мощности при частичных нагрузках (рисунок 4.6, таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Зависимость $\cos \varphi$ от нагрузки, % (для двигателя АИР80В4)

125%	100%	75%	50%
0,81	0,80	0,73	0,65

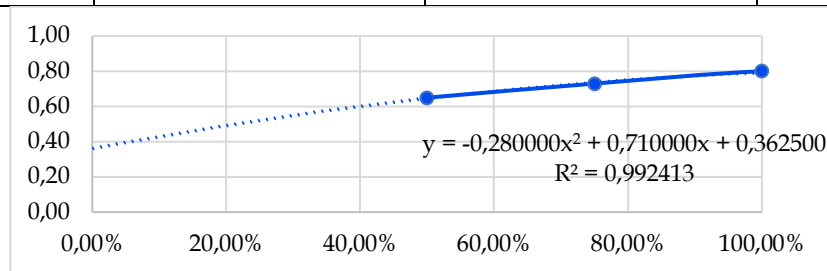


Рисунок 4.6 – Нахождения уравнения для зависимости $\cos \varphi$ от нагрузки, %

Расчетный КПД в зависимости от $\cos \varphi$ и нагрузки приведен в таблице 4.8:

Таблица 4.8 – Расчетный КПД при вариации нагрузки

Нагрузка, %	КПД	$\cos \varphi$
100	0,7876	0,80
75	0,7809	0,75
50	0,6960	0,66
30	0,5903	0,56
20	0,3460	0,50
1	0,0242	0,38
0	0,0000	0,37

Расчет параметров двигателя АИР80В4 при вариации нагрузки (таблица 4.9):

Таблица 4.9 – Расчетные параметры работы двигателя при вариации нагрузки в нормальном состоянии

Нормальное состояние		s	$M_{расч}$	n , об/мин	I_a , А	P_2 , кВт	P_1 , кВт
$M_{НОМ}$	10,230	0,060	10	1410	3,56	1,476	1,863
$0,8 \cdot M_{НОМ}$	8,184	0,047	8,187	1429,35	3,2	1,225	1,588
$0,6 \cdot M_{НОМ}$	6,138	0,0348	6,136	1447,8	3,1	0,930	1,408
$0,4 \cdot M_{НОМ}$	4,092	0,023	4,095	1465,5	2,9	0,628	1,153
$0,2 \cdot M_{НОМ}$	2,046	0,011	2,042	1482,9	2,78	0,317	0,907
$0,01 \cdot M_{НОМ}$	0,102	0,001	0,102	1499,145	2,67	0,016	0,610
Х.Х.	0,000	0,000	0,000	1499,999	2,5	0,000	0,601

Для построения модели (4.7) был исследован и определен процентный вклад потерь при разных типах дефектов при вариации нагрузки на основе результатов, полученных в разделах 3.2-3.4 и 4.3 (рисунки 4.7-4.8). Для модели используется график нагрузки оборудования, характерный для предприятий транспорта нефти, рассмотренных в разделе 1.4.3 (рисунок 4.9).

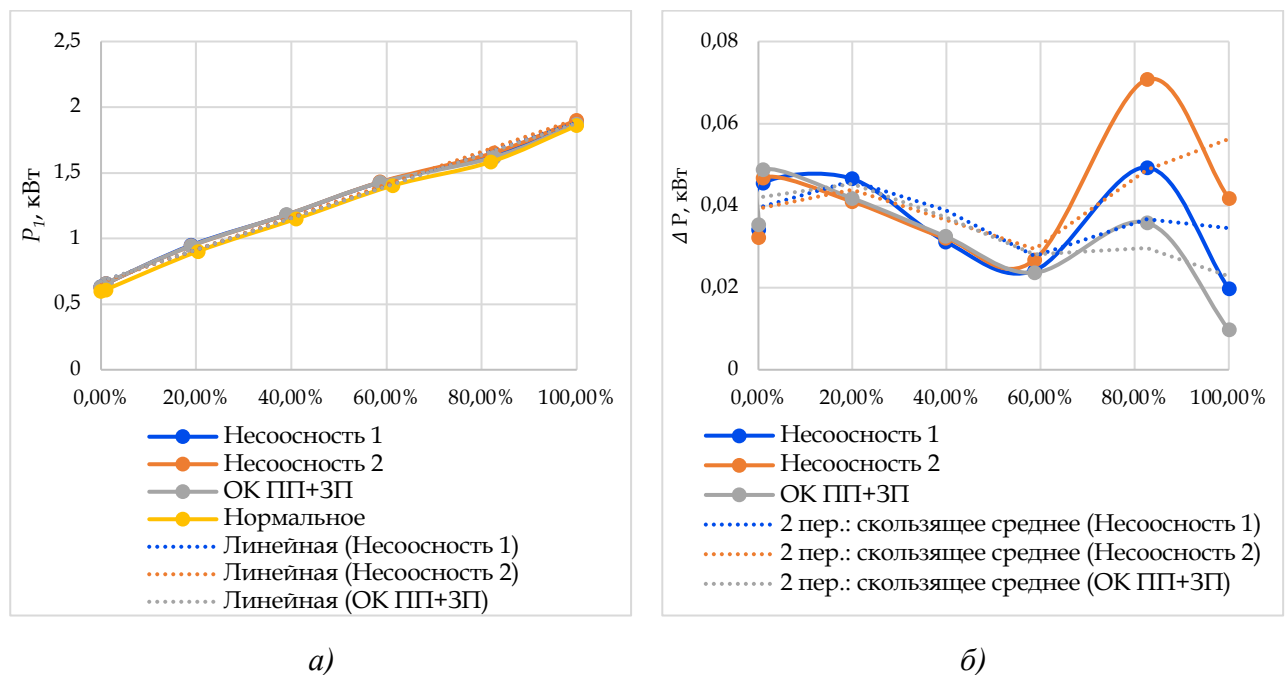


Рисунок 4.7 – Оценка вклада потерь при разных типах дефектов при вариации нагрузки: а) потребляемая мощность АД, б) потери мощности

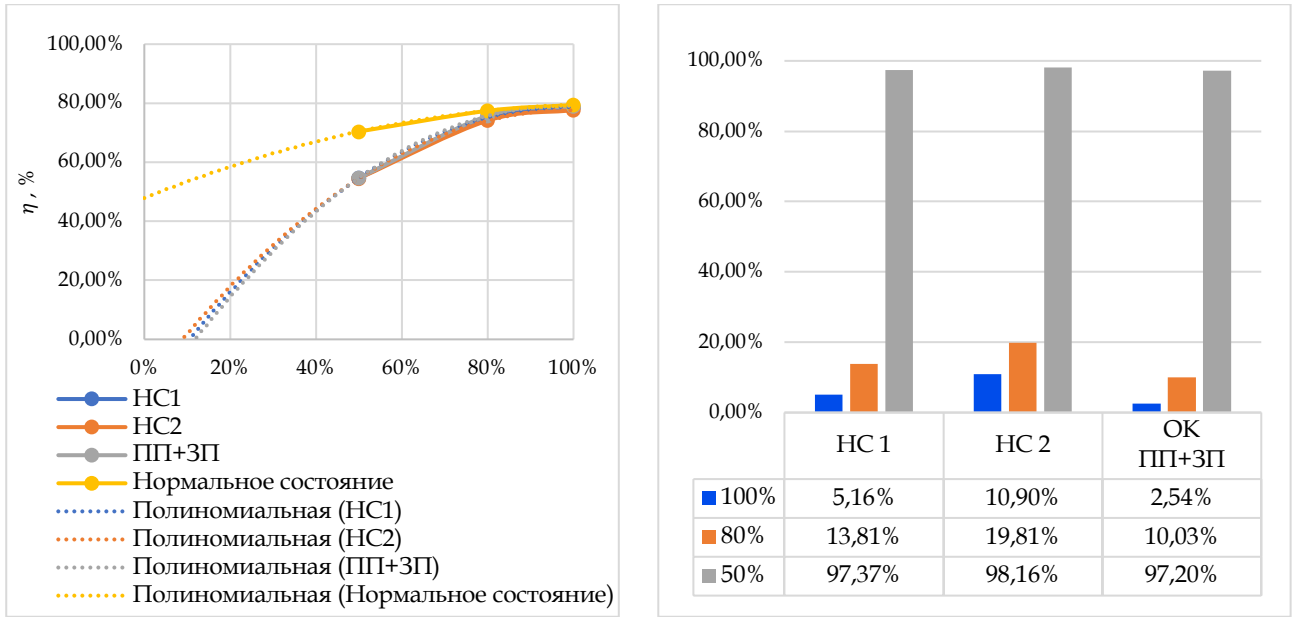


Рисунок 4.8 – Оценка вклада потерь при разных типах дефектов при вариации нагрузки:
 а) изменение КПД, б) прирост потерь мощности при наличии исследуемых дефектов относительно номинальных потерь

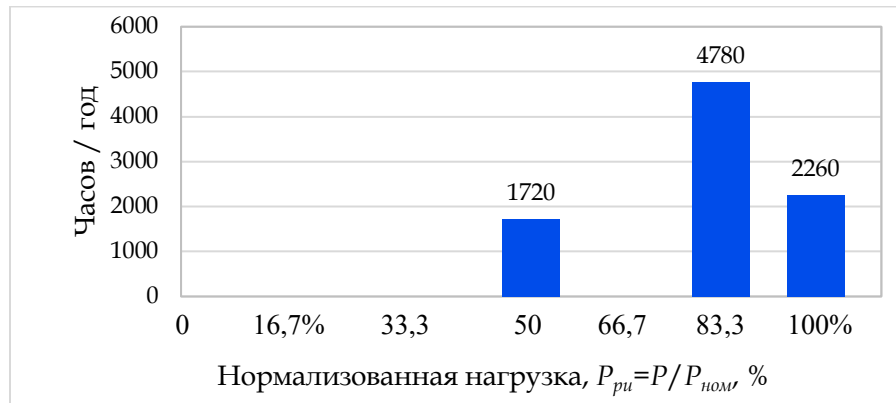


Рисунок 4.9 – Характерное распределение нагрузки для предприятий транспорта нефти, используемое в модели

При $T = 8760$ часов работы в год среднегодовые P_m и среднеквадратичные P_{RMS} значения нагрузки механической мощности составляют (4.18-19) [17]:

$$P_m = \frac{1}{T} \sum_k P(t_k) \cdot t_k, \tag{4.18}$$

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_k P^2(t_k) \cdot t_k}, \tag{4.19}$$

где t_k – k-й интервал времени.

Тогда годовое количество поглощенной электроэнергии, обусловленной механической нагрузкой (4.20):

$$E_M = \int_0^T P(t) dt = T \cdot P_m, \quad P_m = \frac{1}{T} \sum_k P(t_k) \cdot t_k. \quad (4.20)$$

Для получения модели потери мощности используются данные об эффективности двигателей из каталога производителя [60]. Для двигателей класса энергоэффективности IE2 ВА производителя РУСЭЛПРОМ используется таблица значений коэффициента полезного действия при частичных нагрузках (рисунок 4.10, таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Зависимость КПД от нагрузки, %, для рассматриваемого модельного ряда двигателей

125%	100%	75%	50%
92,00	93,00	93,00	92,50
91,00	92,00	92,50	92,00
90,00	91,00	91,50	91,00
89,00	90,00	90,00	89,00
88,00	89,00	89,00	88,00
87,00	88,00	88,00	87,00
85,00	86,00	86,50	85,50
84,00	85,00	85,50	83,50
83,00	84,00	84,50	82,50
81,50	83,00	83,00	81,50
80,50	82,00	82,00	80,50
79,00	81,00	81,00	79,00
78,00	80,00	80,00	78,00
76,60	79,00	79,00	77,00
75,50	78,00	78,00	76,00
75,00	77,00	77,00	75,00
74,50	76,00	75,50	73,50
73,50	75,00	74,50	71,00
72,50	74,00	73,50	70,00
71,50	73,00	72,50	67,50
70,50	72,00	71,50	66,00
62,00	64,00	63,00	59,00

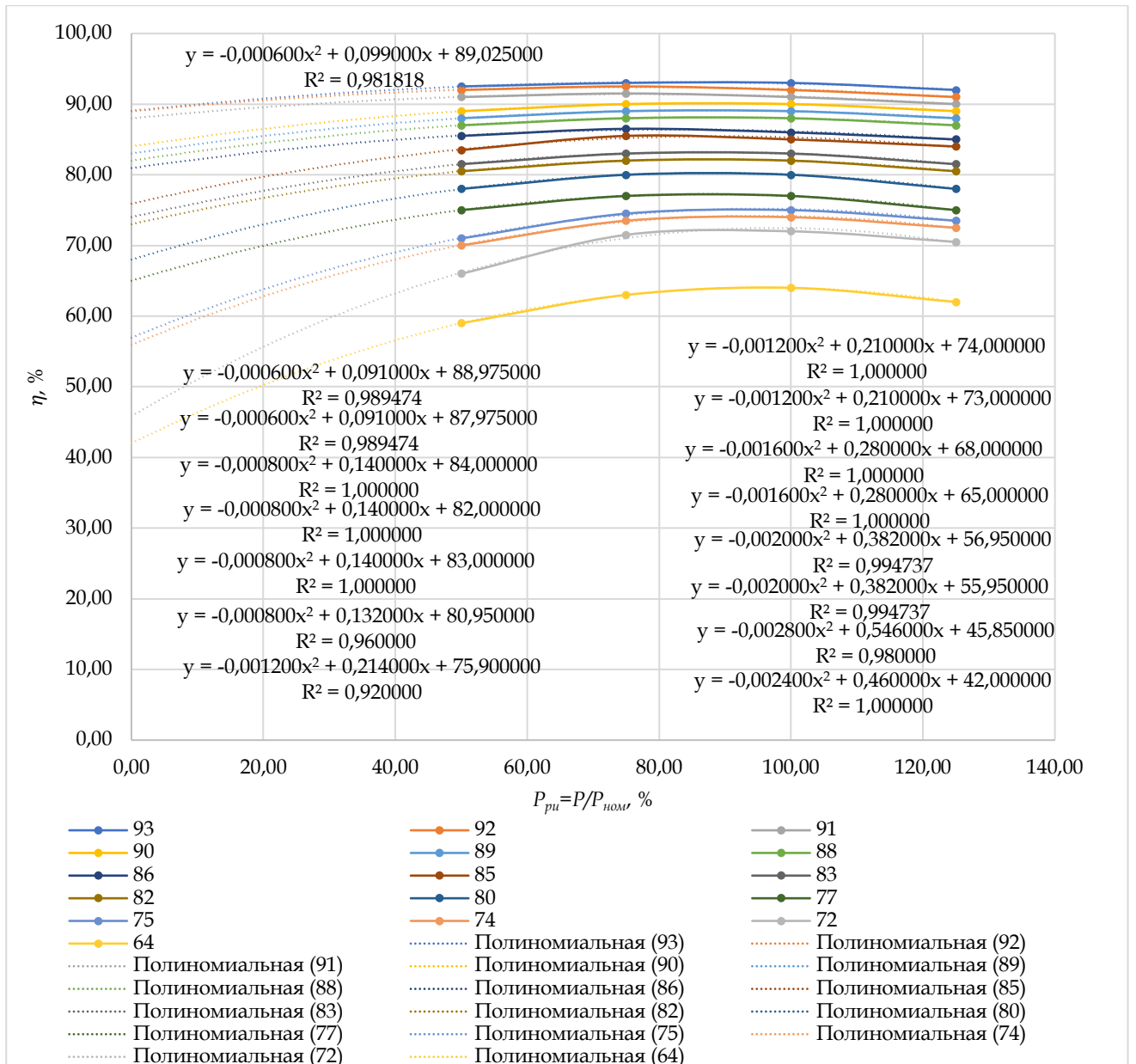


Рисунок 4.10 – Аппроксимированные зависимости КПД от нагрузки для модельного ряда АД, %

Расчет конструкционных потерь P_L производится на основании упрощенной биномиальной модели потери мощности, аналогичной приведенной в работах [11, 73, 86] (4.21). Данные потери состоят из постоянных k_{LF} – не зависящих от нагрузки двигателя, соответствующие потерям в стали, потерям на трение и самовентиляцию, а также переменных потерь k_{LV} – соответствующих гистерезисным и зависимым от квадрата нормализованной или относительной загрузки двигателя $P_{ри}^2$.

$$P_L = P_{pu} \cdot P_{ном} \left(\frac{1}{\eta(P_{ном}, P_{pu})} - 1 \right) \cong k_{LF} + k_{LV} \cdot P_{pu}^2. \quad (4.21)$$

На основании [73], для каждого двигателя значения коэффициентов потерь могут быть определены по модели линейной регрессии данных о потерях мощности в зависимости от квадрата относительной нагрузки. Тогда используя результаты расчета потерь P_L при вариации нагрузки, получены модели аппроксимации для рассматриваемого ряда двигателей (рисунок 4.11):

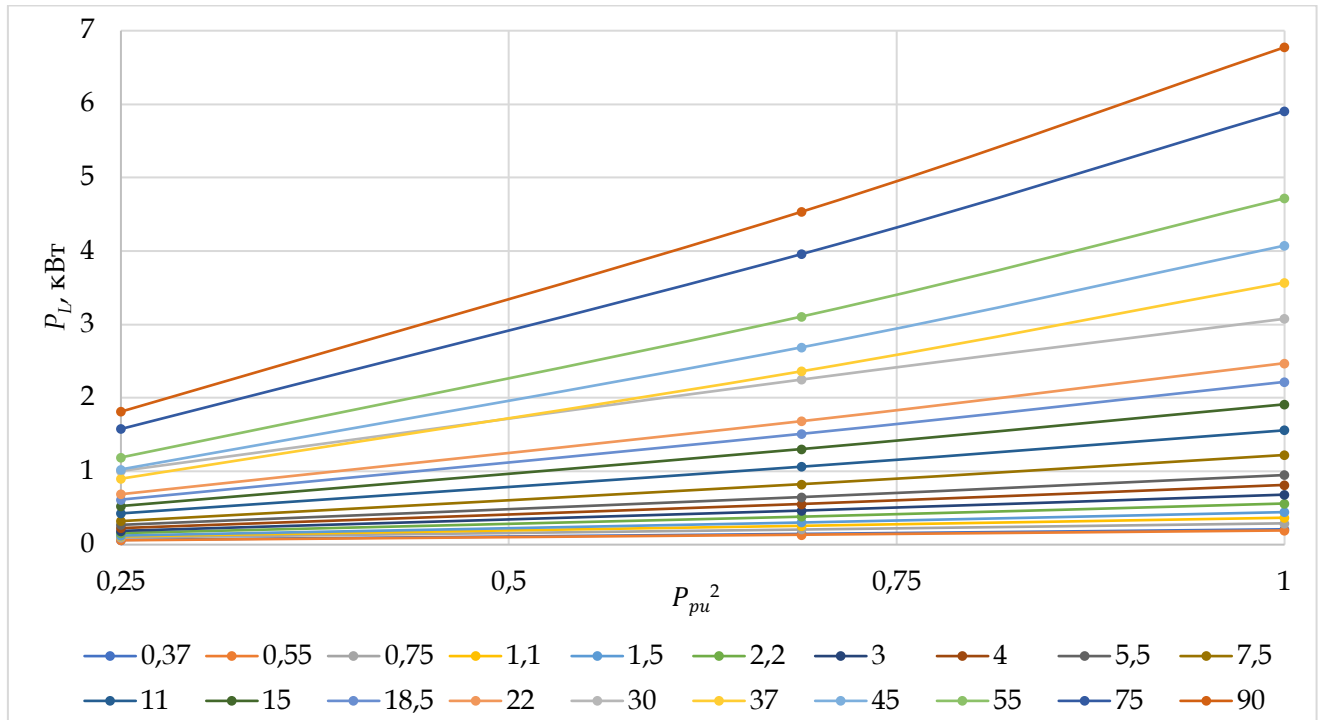


Рисунок 4.11 – Получение моделей аппроксимации конструкционных потерь в зависимости от квадрата нормализованной нагрузки

Идентифицированные значения коэффициентов постоянных и переменных потерь, полученных из рисунка 4.11, приведены в таблице 4.11:

Таблица 4.11 – Определение коэффициентов k_{LF} и k_{LV} на основании рисунка 4.11

$P_{ном}, \text{кВт}$	Уравнение аппроксимации	Степень достоверности	k_{LF}	k_{LV}
0,37	$y = 0,1922x + 0,0157$	$R^2 = 0,9995$	0,0157	0,1922
0,55	$y = 0,1783x + 0,0139$	$R^2 = 0,9995$	0,0139	0,1783
0,75	$y = 0,2563x + 0,0321$	$R^2 = 0,9992$	0,0321	0,2563
1,1	$y = 0,3376x + 0,0271$	$R^2 = 0,9995$	0,0271	0,3376
1,5	$y = 0,4244x + 0,0151$	$R^2 = 0,9989$	0,0151	0,4244
2,2	$y = 0,5348x + 0,0207$	$R^2 = 0,9987$	0,0207	0,5348
3	$y = 0,6561x + 0,0201$	$R^2 = 0,9992$	0,0201	0,6561

Продолжение Таблицы 4.11

4	$y = 0,7816x + 0,0258$	$R^2 = 0,9991$	0,0258	0,7816
5,5	$y = 0,9013x + 0,0393$	$R^2 = 0,999$	0,0393	0,9013
7,5	$y = 1,197x + 0,0149$	$R^2 = 0,9991$	0,0149	1,197
11	$y = 1,5049x + 0,0422$	$R^2 = 0,9993$	0,0422	1,5049
15	$y = 1,8415x + 0,0562$	$R^2 = 0,9992$	0,0562	1,8415
18,5	$y = 2,1322x + 0,0683$	$R^2 = 0,9991$	0,0683	2,1322
22	$y = 2,3725x + 0,0802$	$R^2 = 0,999$	0,0802	2,3725
30	$y = 2,7684x + 0,3202$	$R^2 = 0,9997$	0,3202	2,7684
37	$y = 3,5478x - 0,0162$	$R^2 = 0,9982$	0,0162	3,5478
45	$y = 4,0461x - 0,0195$	$R^2 = 0,998$	0,0195	4,0461
55	$y = 4,6850x - 0,0236$	$R^2 = 0,9978$	0,0236	4,685
75	$y = 5,7519x + 0,0958$	$R^2 = 0,9984$	0,0958	5,7519
90	$y = 6,5903x + 0,1143$	$R^2 = 0,9983$	0,1143	6,5903

Аналогично, с учетом вклада потерь, определенных на основе экспериментов (рисунок 4.8), модели аппроксимации и коэффициенты потерь примут следующий вид (рисунок 4.12, таблица 4.12):

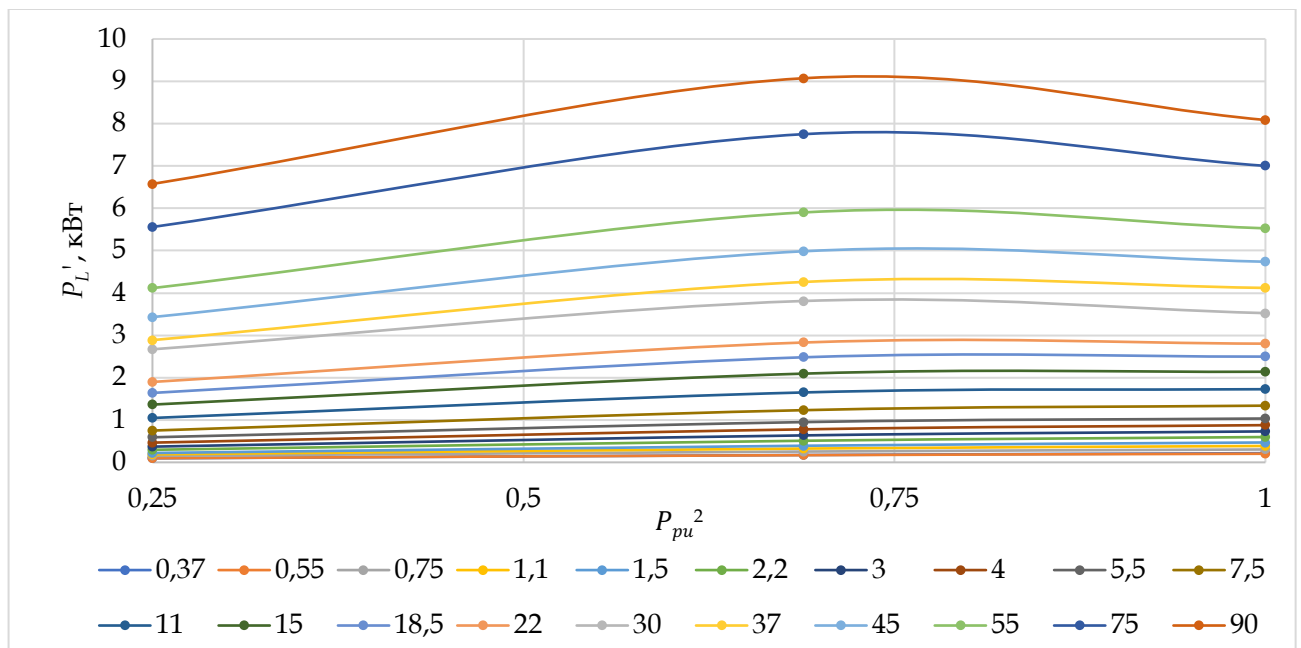


Рисунок 4.12 – Получение моделей аппроксимации конструкционных потерь с учетом дефекта в зависимости от квадрата нормализованной нагрузки

Таблица 4.12 – Определение коэффициентов k'_{LF} и k'_{LV} с учетом наличия дефекта

$P_{НОМ}$, кВт	Уравнение аппроксимации	Степень достоверности	k'_{LF}	k'_{LV}
0,37	$y = 0,1631x + 0,0565$	$R^2 = 0,9956$	0,0565	0,1631
0,55	$y = 0,1423x + 0,0651$	$R^2 = 0,9874$	0,0651	0,1423
0,75	$y = 0,2033x + 0,1061$	$R^2 = 0,9902$	0,1061	0,2033
1,1	$y = 0,2667x + 0,1279$	$R^2 = 0,986$	0,1279	0,2667
1,5	$y = 0,3345x + 0,1449$	$R^2 = 0,9862$	0,1449	0,3345
2,2	$y = 0,4072x + 0,205$	$R^2 = 0,9808$	0,205	0,4072
3	$y = 0,4878x + 0,2644$	$R^2 = 0,9713$	0,2644	0,4878
4	$y = 0,5616x + 0,3451$	$R^2 = 0,963$	0,3451	0,5616
5,5	$y = 0,6057x + 0,4678$	$R^2 = 0,9414$	0,4678	0,6057
7,5	$y = 0,805x + 0,5873$	$R^2 = 0,9365$	0,5873	0,805
11	$y = 0,9367x + 0,87$	$R^2 = 0,8992$	0,87	0,9367
15	$y = 1,0765x + 1,1709$	$R^2 = 0,8662$	1,1709	1,0765
18,5	$y = 1,1952x + 1,4338$	$R^2 = 0,8415$	1,4338	1,1952
22	$y = 1,2658x + 1,693$	$R^2 = 0,8099$	1,693	1,2658
30	$y = 1,2355x + 2,5369$	$R^2 = 0,6147$	2,5369	1,2355
37	$y = 1,742x + 2,6303$	$R^2 = 0,754$	2,6303	1,742
45	$y = 1,8619x + 3,1817$	$R^2 = 0,705$	3,1817	1,8619
55	$y = 2,0271x + 3,8719$	$R^2 = 0,6563$	3,8719	2,0271
75	$y = 2,1277x + 5,3961$	$R^2 = 0,5173$	5,3961	2,1277
90	$y = 2,2554x + 6,454$	$R^2 = 0,4568$	6,454	2,2554

Тогда количество потерь электроэнергии в течение первого года эксплуатации составит (4.22):

$$E_L = \int_0^T P_L dt \approx \int_0^T \left(k_{LF} + k_{LV} \cdot \frac{P^2(t)}{P_{НОМ}^2} \right) dt = T \cdot \left(k_{LF} + k_{LV} \cdot \frac{P_{RMS}^2}{P_{НОМ}^2} \right). \quad (4.22)$$

Соответственно, с учетом дополнительных потерь, обусловленных наличием дефекта, формула примет вид (4.23):

$$E'_L = \int_0^T P'_L dt \approx \int_0^T \left(k'_{LF} + k'_{LV} \cdot \frac{P^2(t)}{P_{НОМ}^2} \right) dt = T \cdot \left(k'_{LF} + k'_{LV} \cdot \frac{P_{RMS}^2}{P_{НОМ}^2} \right). \quad (4.23)$$

1. Стоимость электроэнергии.

Стоимость электроэнергии и ее рост определены на основе ретроспективного анализа изменения прогноза свободных (нерегулируемых) цен на электрическую энергию (мощность) для II ценовой зоны, по данным НП «Совет рынка» за период 2017-2023 гг. (рисунок 4.13).

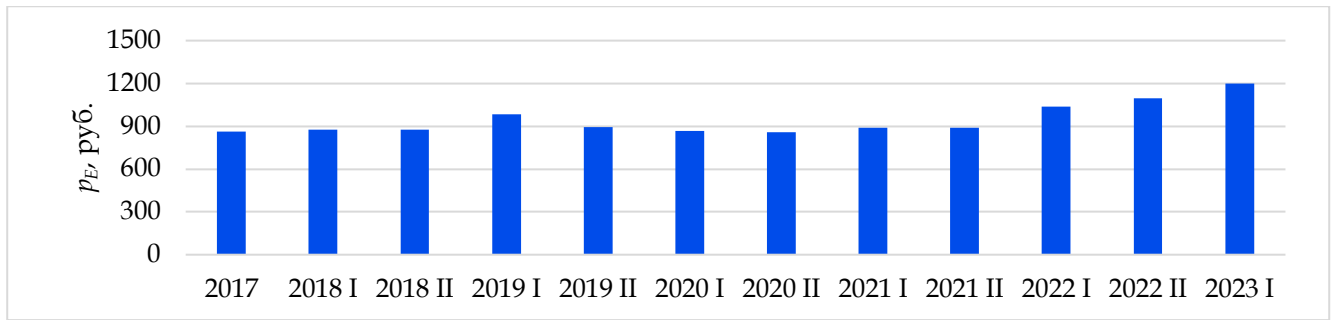


Рисунок 4.13 – Динамика цены на электроэнергию, данные по оптовому рынку, II ц.з.
руб./МВт·ч [53]

Таким образом, $p_E = 1,2$ руб/кВт · ч, $\Delta p_E = 0,026$.

Для определения кумулятивной фактической стоимости потерь энергии на протяжении всего срока службы двигателя, C_{PEL} , необходимо учитывать эффект амортизации денег на протяжении N ожидаемых лет срока службы двигателя с помощью ставки дисконтирования d и эффекта годового изменения стоимости электроэнергии Δp_E , в результате чего (4.24):

$$\begin{aligned}
 C_{PEL} = NPV(C_{EL}) &= \sum_{n=1}^N C_{EL} \cdot \frac{(1 + \Delta p_E)^n}{(1 + d)^n} = \sum_{n=1}^N C_{EL} \cdot \frac{1}{(1 + d_{eq})^n} = \\
 &= C_{EL} \cdot \frac{(1 + d_{eq})^N - 1}{d_{eq}(1 + d_{eq})^N},
 \end{aligned} \quad (4.24)$$

где C_{EL} – стоимость потерь в течение первого года эксплуатации;

d_{eq} – эквивалентная ставка дисконтирования, учитывающая изменения стоимости электроэнергии (4.25):

$$d_{eq} = \frac{d - \Delta p_E}{1 + \Delta p_E}. \quad (4.25)$$

Соответственно, коэффициент кумулятивной приведенной стоимости электроэнергии (4.26):

$$k_{p1} = \frac{(1 + d_{eq})^N - 1}{d_{eq}(1 + d_{eq})^N}. \quad (4.26)$$

Тогда формула (4.24) примет вид (4.27):

$$C_{PEL} = C_{EL} \cdot k_{p1} = E_L \cdot p_E \cdot k_{p1}. \quad (4.27)$$

Аналогично, с учетом потерь при наличии дефекта (4.28):

$$C'_{PEL} = C'_{EL} \cdot k_{p1} = E'_L \cdot p_E \cdot k_{p1}. \quad (4.28)$$

Таким образом, для определенного модельного ряда двигателей с характерной механической нагрузкой варьируются следующие переменные: уровень потерь, обусловленных наличием дефекта, цена на электроэнергию, ставка дисконтирования, сдвиг плана ТОиР, выраженный в процентном отношении (таблица 4.13).

Таблица 4.13 – Рассматриваемые в модели условия

Цена на э/э, руб./кВт·ч	1,2		1,7		2,5	
Ставка дисконтирования	5 %		10 %		15 %	
Потери (прирост относительно потерь с наличием дефекта)	+1%	+5%	+10%	+50%	+100%	+200%
Сдвиг ТОиР	+20% к МРП		10%		5%	

Вариации переменных рассматривается относительно базовой линии. За базовую линию принимается стоимость жизненного цикла для двигателей без учета дополнительных потерь, обусловленных наличием дефекта, то есть, в номинальном состоянии, а также при плановом ТОиР (таблица 4.6). Семейство базовых линий при вариации цены на электроэнергию и ставки дисконтирования для рассматриваемого диапазона мощностей двигателей серии ВА приведено на рисунке 4.14.

Анализируя полученные графики, можно сделать следующий вывод: стоимость жизненного цикла двигателей мощностью до 3 кВт обладает высокой чувствительностью к начальным задаваемым экономическим условиям (цена на электроэнергию и ставка дисконтирования).

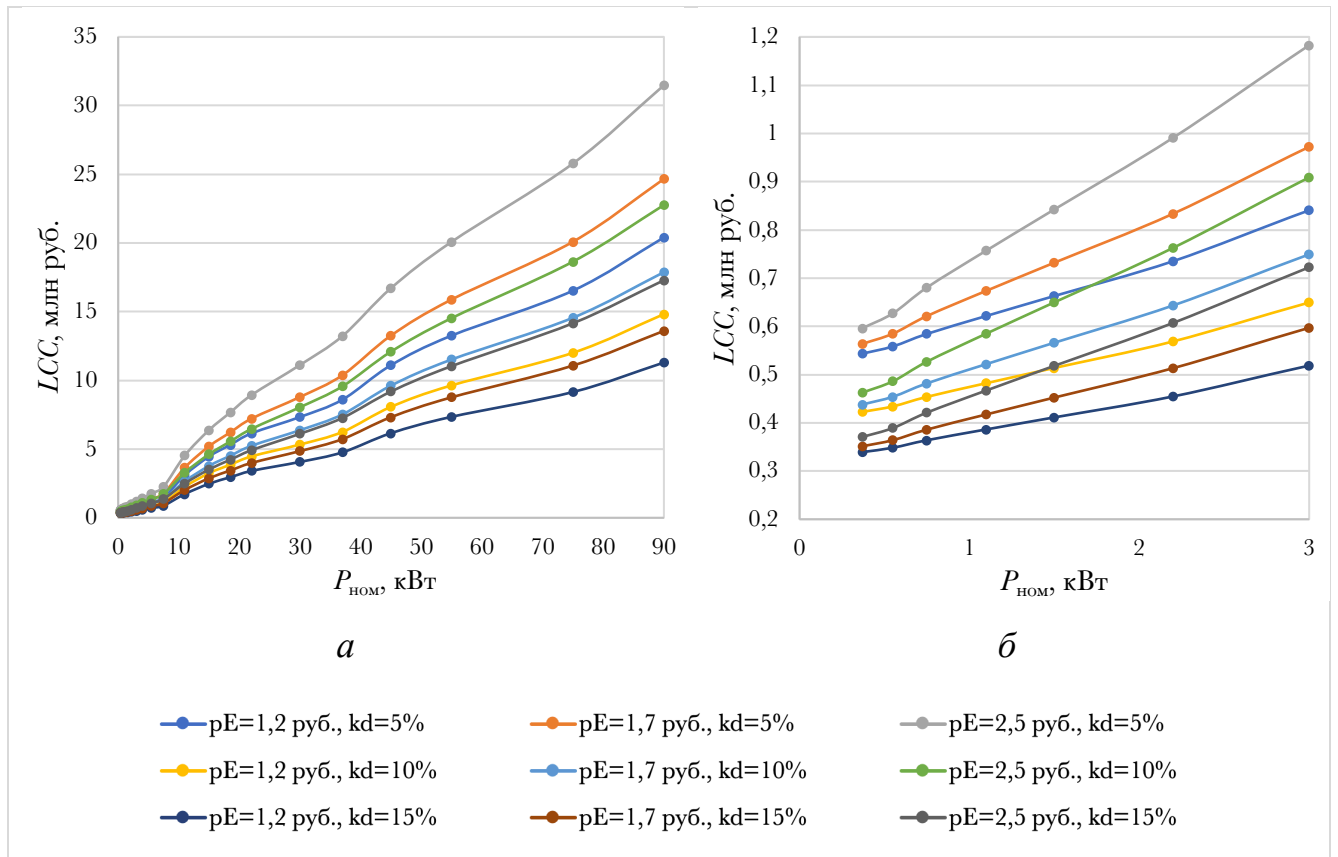


Рисунок 4.14 – Базовые линии стоимости жизненного цикла при вариации цены на электроэнергию и ставки дисконтирования: а) – для диапазона мощностей 0,37-90 кВт; б) – для диапазона 0,37-2 кВт

Для дальнейшей оценки вариативности условий роста потерь и сдвига плана ТООР рассматривается минимальная цена (средняя текущая), равная тысячи двумстам рублей за МВт·ч и ставка дисконта 5% (рисунок 4.15).

Результаты демонстрируют следующее: для двигателей до 0,75 кВт не допускается рост дополнительных потерь свыше 40% при любом регулировании ТООР, в остальных случаях с ростом номинальной мощности двигателя точка пересечения базовой линии снижается по проценту потерь, однако сохраняется эффект экономии стоимости жизненного цикла за счет регулирования ТООР (рисунок 4.16, Приложение В).

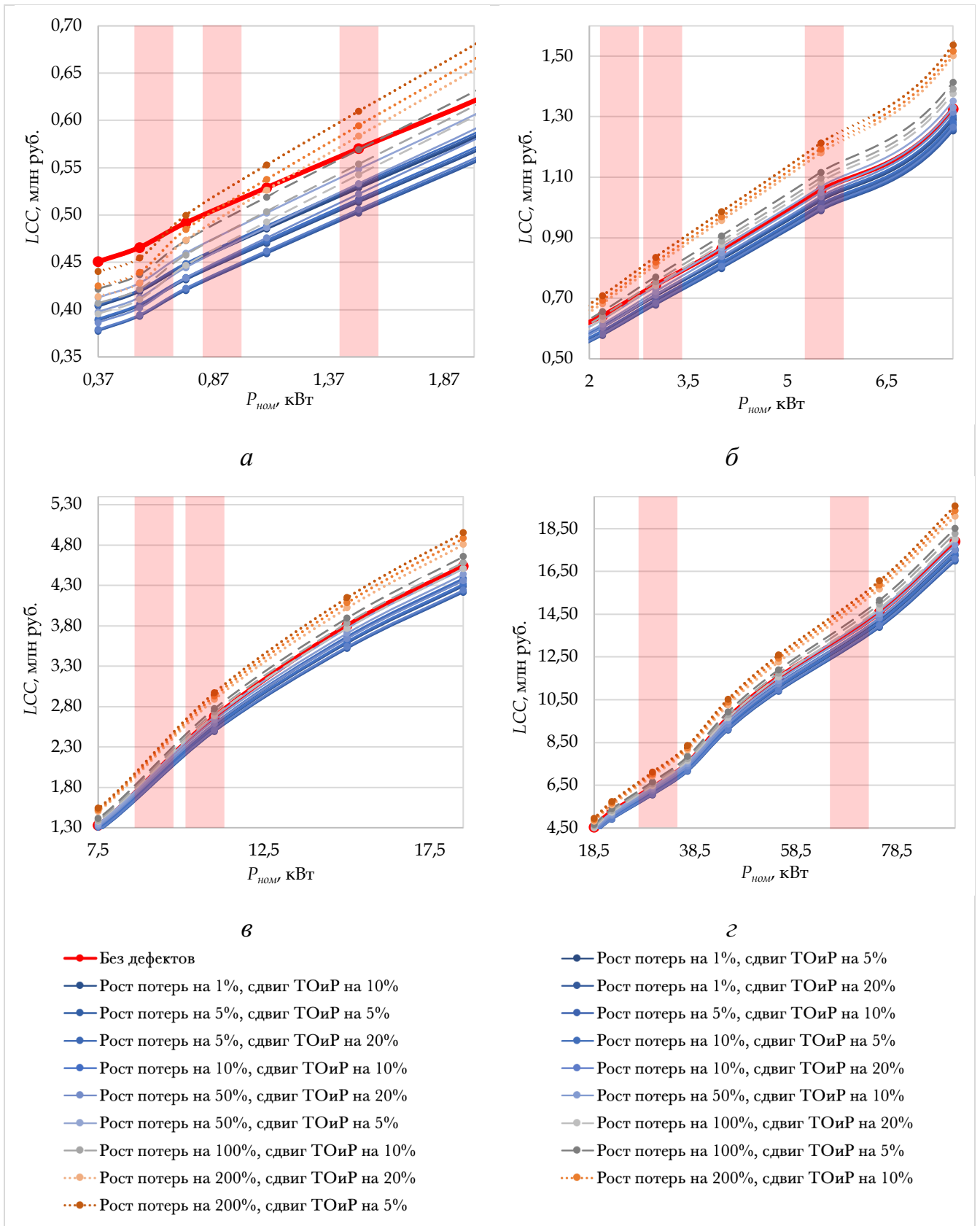


Рисунок 4.15 – Оценка изменения LCC при изменении потерь и сдвига ТОиР относительно базовой линии стоимости жизненного цикла при стоимости электроэнергии 1,2 руб./кВт·ч и ставке дисконтирования 5%: а) – для диапазона мощностей 0,37-2 кВт;

б) – для диапазона 2-7,5кВт; в) – для диапазона 7,5-18 кВт; г) – для диапазона 18-90 кВт.

Поперечные блоки – зоны пересечения базовой линии

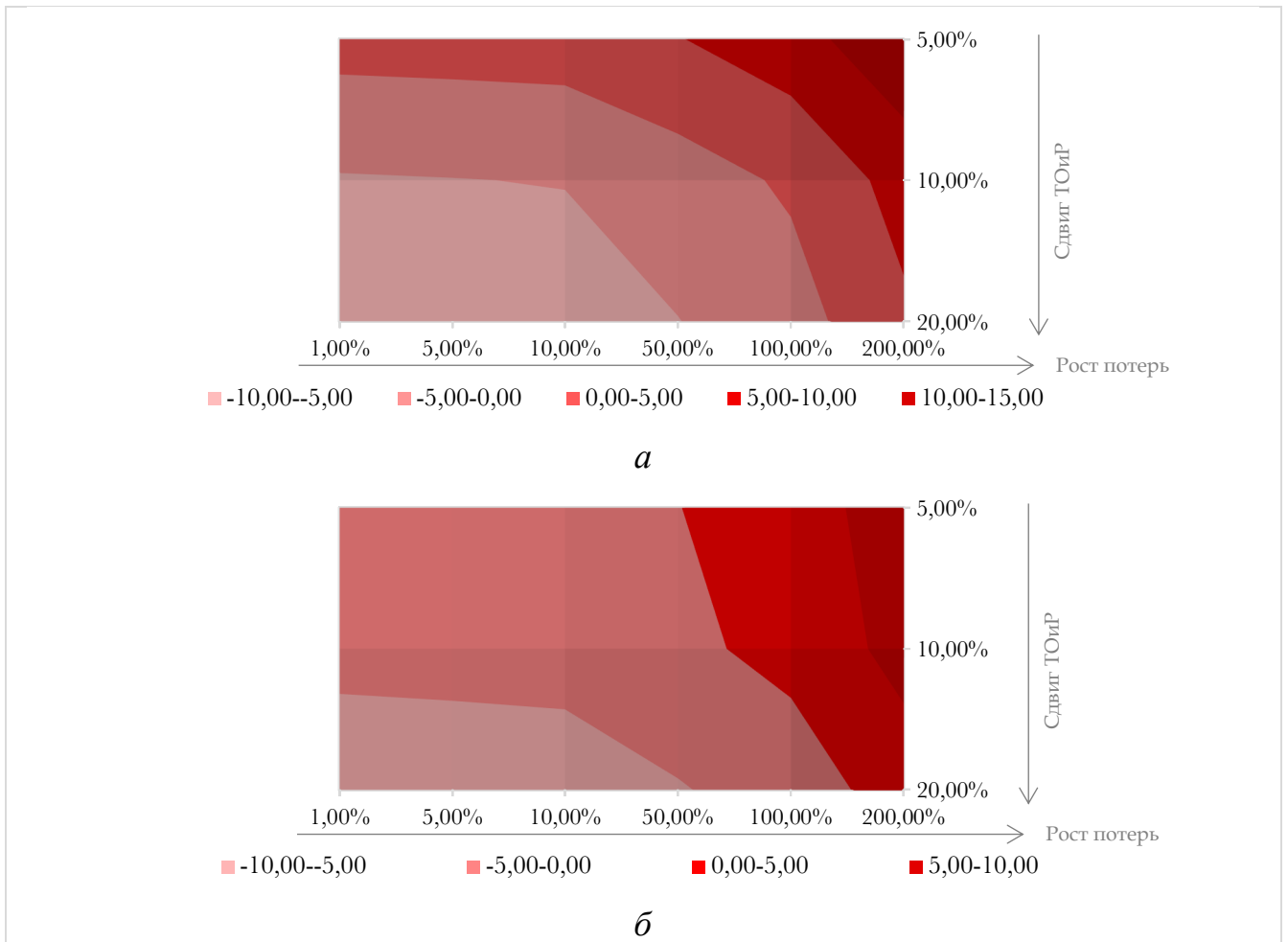


Рисунок 4.16 – Определение зоны эффективного регулирования плана ТОиР в зависимости от потерь и LCC при стоимости электроэнергии 1,2 руб./кВт·ч и ставке дисконтирования 5% (отношение LCC к LCC базовой линии): *а*) – для двигателя $P_{ном} = 1,5$ кВт;

б) – для двигателя $P_{ном} = 90$ кВт

Граничным условием для системы принятия решения по эффективному регулированию ТОиР в зависимости от потерь и LCC будет условие не превышения предельно допустимых значений по перегреву обмоток статора. Периодичность проведения подобной оценки может проводиться при обновлении данных по любому из параметров модели (4.7).

На основе выше приведенного установлено, что применение алгоритма управления ТОиР на основе раннего обнаружения повреждения позволяет снизить затраты стоимости на жизненном цикле эксплуатации до 8% и потери электроэнергии, обусловленные наличием дефекта, до 5%. Общая структура системы принятия решения по воздействию на план ТОиР на основе представленных алгоритмов в разделах 2.5 и 4.2 приведена на рисунке 4.17.

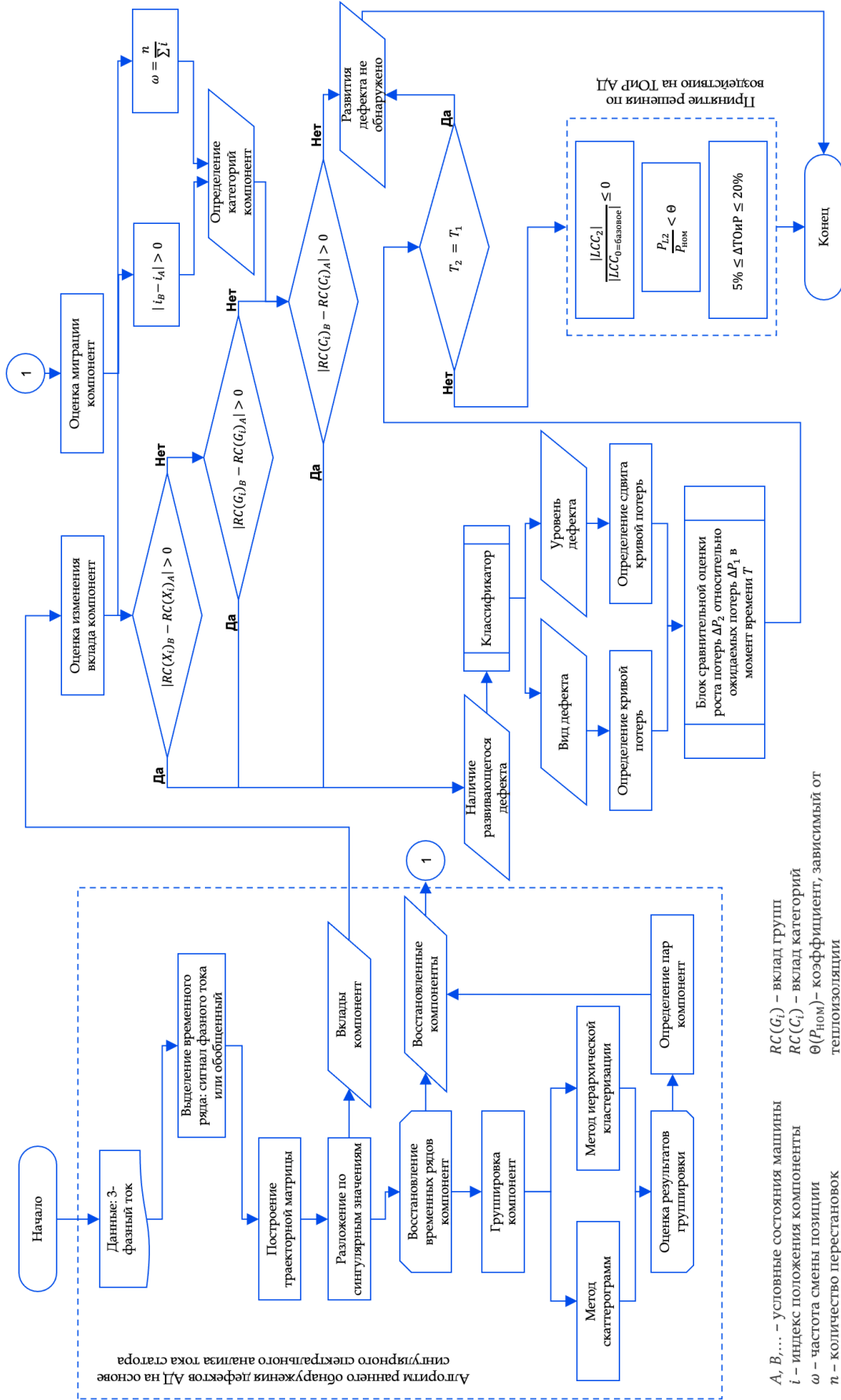


Рисунок 4.17 – Общая схема системы принятия решения на основе представленных алгоритмов сингулярного спектрального анализа применительно к току статора АД и воздействия на план ТОиР

4.5 Выводы по главе 4

1. Предложен алгоритм воздействия на план ТОиР асинхронных двигателей в составе электротехнического комплекса на основе алгоритма раннего обнаружения дефектов АД с целью определения отклонения фактической кривой потерь электроэнергии с учетом вклада компонент и определения уровня их изменения.

2. Разработана модель оценки стоимости жизненного цикла, учитывающая режим работы АД в составе ЭТК транспорта нефти, потери, обусловленные нагрузкой, конструкционными особенностями и наличием дефекта, а также стоимость потребляемой электроэнергии на протяжении жизненного цикла и стоимость обслуживания асинхронного двигателя.

3. На основе оценки вклада потерь при разных типах дефектов при вариации нагрузки в диапазоне от 50 до 100% , полученной по результатам экспериментов в главе 3, установлено, что существование дефектов вида «несоосность» и «ослабление креплений» на ранней стадии развития приводит к значительному расходу электрической энергии и составляют от 2,5 до 11 % относительно номинальных потерь в период эксплуатации.

4. Установлено, что при переносе ТОиР в диапазоне 5-20% к межремонтному периоду, по расчету модели оценки стоимости жизненного цикла, не допускается рост потерь свыше 40% при любом диапазоне регулирования ТОиР для АД в диапазоне установленной мощности 0,37-2 кВт; пересечение базовой линии для АД в диапазоне установленной мощности 2-18,5 кВт наступает при росте потерь свыше 33%, для АД в диапазоне установленной мощности 18,5-90 кВт пересечение базовой линии достигается при потерях свыше 24%.

5. Предложена структура системы принятия решения по воздействию на план ТОиР на основе разработанного алгоритма раннего обнаружения дефектов АД методом сингулярного спектрального анализа применительно к сигналу тока статора АД, алгоритма воздействия на план ТОиР АД в составе ЭТК транспорта нефти, а также результатов расчета модели оценки стоимости жизненного цикла АД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научной задачи повышения эффективности эксплуатации асинхронного электропривода на основе ранней идентификации дефектов методом сингулярного спектрального анализа.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Проанализировано современное состояние НПП РФ, обоснована необходимость повышения эффективности эксплуатации АД на предприятиях нефти и газа. Обоснована необходимость создания методов обнаружения повреждений на ранней стадии, а также определения потерь, обусловленных повреждениями для своевременного принятия решений в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов.

2. На основе проведенного имитационного моделирования подтверждено влияние наличия дефектов АД на энергетические показатели эффективности АД; на основе экспериментальных исследований установлено, что наличие дефектов АД при номинальной нагрузке приводит к дополнительным потерям в случае образования раковин в подшипнике до 10 %, несоосности – 11%, ослабления креплений – 2,5% относительно номинальных потерь.

3. Разработан алгоритм обнаружения неисправностей АД на основе сингулярного спектрального анализа применительно к сигналам тока статора АД. Предложены новые признаки выделяемых компонент по свойству стационарности: стационарные, слабостационарные, мигрирующие учитывающий различные методы группировки компонент и определение их вклада. Экспериментально установлено, что разработанный алгоритм позволяет провести декомпозицию сигнала и, по результатам группировки компонент на основе определения вклада и выявления миграции компонент, установить наличие дефекта на ранней стадии развития.

4. По результатам экспериментальных исследований установлено, что методы, основанные на спектральном анализе тока, не позволяют выявить

повреждения на начальной стадии развития и однозначно дать информацию о наличии дефекта и его изменении. Сравнительный анализ показал превосходство предлагаемой методики на основе сингулярного разложения относительно анализа тока методом быстрого преобразования Фурье.

5. Установлены зависимости изменения уровня вклада компонент при разложении фазных токов и обобщенного тока от уровня изменения дефектов асинхронного двигателя. Выявлено, что рост уровня вклада компонент, соотносящихся с наличием и развитием дефекта, соответствует росту потерь мощности, обусловленных наличием дефекта.

6. Разработана модель оценки стоимости жизненного цикла (LCC), учитывающая режим работы АД в составе ЭТК транспорта нефти, потери, обусловленные нагрузкой, конструкционными особенностями и наличием дефекта, а также стоимость потребляемой электроэнергии на протяжении жизненного цикла и стоимость обслуживания асинхронного двигателя.

7. Предложена структура системы принятий решения по воздействию на план ТОиР, включающая алгоритм воздействия на план ТОиР АД в составе ЭТК на основе алгоритма раннего обнаружения дефектов АД методом сингулярного спектрального анализа с целью определения отклонения фактической кривой потерь электроэнергии с учетом вклада компонент и определения уровня их изменения.

8. Установлено, что применение системы принятия решения по воздействию на план ТОиР в зависимости от потерь, вызванных развивающимся дефектом, и оценки на основе стоимости жизненного цикла позволяет снизить затраты стоимости на жизненном цикле эксплуатации до 8% и потери электроэнергии, обусловленные наличием дефекта, до 5%.

В работе выделен ряд аспектов для развития темы и проведения дополнительных исследований, включая переход к распознаванию влияния сопряженного оборудования, исключению влияния гармонических искажений на результаты дифференциации дефектов в сингулярных компонентных картах АД и как следствие – обнаружению причин появления дефекта.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВО	–	Аппарат воздушного охлаждения
АД	–	Асинхронный двигатель
АДКЗР	–	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
АСПО	–	Асфальтосмолопарафиновые отложения
АЦП	–	Аналогово-цифровой преобразователь
БКНС	–	Блочная кустовая насосная станция
БПФ	–	Быстрое преобразование Фурье
ВИЭ	–	Возобновляемые источники энергии
ВРБ	–	Водораспределительный блок
ГЗУ	–	Групповая замерная установка
ГПА	–	Газоперекачивающий агрегат
ГРС	–	Газораспределительная станция
ГЧП	–	Государственно-частное партнерство
ДК	–	Диагностический контроль
ДНС	–	Дожимная насосная станция
ИИ	–	Искусственный интеллект
ИНС	–	Искусственная нейронная сеть
КЗ	–	Короткое замыкание
КМ	–	Коэффициент мощности
КНС	–	Кустовая насосная станция
КПД	–	Коэффициент полезного действия
КС	–	Компрессорная станция
МСК	–	Минерально-сырьевой комплекс
НА	–	Насосный агрегат
НГП	–	Нефтегазовая промышленность
НПЗ	–	Нефтеперерабатывающий завод
НПС	–	Нефтеперекачивающая станция
ОПФ	–	Оконное преобразование Фурье

ПДК	–	Предельно допустимая концентрация
ППД	–	Поддержание пластового давления
ПХГ	–	Подземное хранение газа
СКДГ	–	Сингулярные компонентные диагностические карты
СПГ	–	Сжиженный природный газ
ТОиР	–	Техническое обслуживание и ремонт
ТрИЗ	–	Трудноизвлекаемые запасы
ТЭК	–	Топливо-энергетический комплекс
УВ	–	Углеводороды
УПВ	–	Установка подготовки воды
УПН	–	Установка подготовки нефти
УПСВ	–	Установка предварительного сброса воды
ЭД	–	Электродвигатель
ЭМО	–	Электромеханическое оборудование
ANN	–	Artificial neural network (<i>искусственная нейронная сеть</i>)
CAGR	–	Compound annual growth rate (<i>совокупный среднегодовой темп роста</i>)
EMD	–	Empirical Mode Decomposition (<i>эмпирическая модовая декомпозиция</i>)
FFT	–	Fast Fourier transform (<i>быстрое преобразование Фурье</i>)
ННТ	–	Hilbert–Huang transform (<i>преобразование Гильберта-Хуанга</i>)
KNN	–	k-Nearest Neighbor (<i>метод k ближайших соседей</i>)
LMD	–	Local mean decomposition (<i>локальная средняя декомпозиция</i>)
SSA	–	Singular spectrum analysis (<i>спектральный сингулярный анализ</i>)
SVD	–	Singular value decomposition (<i>сингулярное разложение</i>)
SVM	–	Support vector machine (<i>метод опорных векторов</i>)
VMD	–	Variational mode decomposition (<i>вариационная модовая декомпозиция</i>)
WT	–	Wavelet transform (<i>вейвлет-преобразование</i>)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабакин, В.И. Курсовое проектирование по теории электропривода: учеб. пособие / В.И. Бабакин, Э.Р. Байбурин, О.Г. Кондрашова // Уфа: УГНТУ. – 2007. – С. 61 – 78.
2. Барков, А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова // СПб.: Изд. центр СПбГМТУ. – 2004. – 152 с.
3. Барков, А.В. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / А.В. Барков., Н.А. Баркова. А.А. Борисов, В.В. Федорищев, Д.В. Грищенко // Санкт-Петербург. – 2012.
4. Беляев, П.В. Повреждения обмоток статора асинхронных двигателей и их диагностика / П.В. Беляев, А.П. Головский // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2019. – № 1. – С. 33-37.
5. Блинов, А.М. Система прогнозирования и оценки безопасности и эффективности асинхронного электропривода / А.М. Блинов, Ю.Л. Жуковский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: ООО «Горная книга». – 2017. – С. 290-299.
6. Васильев, Б.Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса. – НМСУ «Горный». – 2014.
7. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. – 3-е изд. перераб. – Л. – 1978. – 832 с.
8. Воропай, Н.И. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай., М.В. Губко, С.П. Ковалев, Л.В. Массель, Д.А. Новиков, А.Н. Райков, С.М. Сендеров, В.А. Стенников // Проблемы управления. – 2019. – № 1.
9. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов // СПб.: КОРОНА принт. – 2003. – 256 с.
10. Господариков, А.П. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере

Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» / А.П. Господариков, И.Е. Ревин, К.В. Морозов // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 571-580.

11. ГОСТ ИЕС/TS 60034-31-2015 Машины электрические вращающиеся. Часть 31. Выбор энергоэффективных двигателей, включая приводы с регулирующей скоростью. Руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2016. – 40 с.

12. ГОСТ Р ИСО 10816-21-2021 Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. – М.: Стандартинформ. – 2019.

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

14. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Стандартинформ. – 2009. – 11 с.

15. РД 153-39ТН-009-96 Положение О системе технического обслуживания и ремонта электроустановок магистральных нефтепроводов.

16. Грановский, С.А. Конструкции и расчет гидротурбин / С.А. Грановский, В.М. Малышев, В.М. Орго, Л.Г. Смоляров // Л.: Машиностроение. – 1974. – 408 с.

17. Ершов, А.М. Системы электроснабжения. Часть 2: Электрические нагрузки. Компенсация реактивной мощности: курс лекций / Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2018. – 230 с.

18. Жежеленко, И.В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя / Жежеленко И.В., Кривоносов В.Е., Василенко С.В. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 202-218.

19. Жуковский, Ю.Л. Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем /

Жуковский Ю.Л., Королёв Н.А., Бабанова И.С. // Горное оборудование и электромеханика. – М. – 2017. – № 6 (133). – С. 20-25.

20. Жуковский, Ю.Л. Исследование применения цифровых технологий для управления жизненным циклом оборудования / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Сборник материалов Форума проектов программ Союзного государства. Минск, БНТУ. – 2018. – С. 52-56.

21. Жуковский, Ю.Л. Оптимизация параметров работы нефтепроводной системы в условиях Крайнего Севера / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Нефтяная столица. Третий Международный молодежный научно-практический форум. Сборник материалов. – 2020. – С. 41-44.

22. Жуковский, Ю.Л. Применение технологии цифровых двойников в составе единого программного комплекса для управления жизненным циклом электрооборудования / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Сборник материалов XLVII научной конференции с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ», 19-24 ноября 2018 г. Институт энергетики и транспортных систем. – 2018. – Ч. 2. – С. 147-150.

23. Жуковский, Ю.Л. Применение технологии цифровых двойников для управления жизненным циклом электрооборудования / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: матер. IX Междунар. молод. науч.-техн. конф. (Казань, 1–5 октября 2018 г.): в 3 т. – Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2018. – С. 189-190.

24. Калинов, А.П., Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / А.П. Калинов, О.В. Браташ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 57. – С. 43-50.

25. Кацман, М.М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений. – 3- изд., испр. – М.: Высш. шк. Издательский центр «Академия». – 2001. – 463 с.

26. Китаев В.Е. Электрические машины. Ч. II. Машины переменного тока: Учеб. пособие для техникумов / В.Е. Китаев, Ю.М. Корхов, В.К. Свирин // Под ред. В.Е. Китаева. – М.: Высш. школа. – 1978. – 184 с.

27. Князькина, В.И. Акустический сигнал как показатель деградиционных процессов при техническом обслуживании горных машин / В.И. Князькина, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 223-236.
28. Козярук, А.Е. Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования, работающего в тяжелых условиях, по электрическим параметрам / А.Е. Козярук, А.В. Кривенко, Ю.Л. Жуковский, А.А. Коржев, С.В. Бабурин, М.С. Черемушкина // Записки Горного института. – 2011. – Т. 192. – С. 162-167.
29. Козярук, А.Е. Система обслуживания электромеханического оборудования машин и механизмов по фактическому состоянию / А.Е. Козярук, Ю.Л. Жуковский // Горное оборудование и электромеханика. – М. – 2014. – № 10. – С. 8-14.
30. Козярук, А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горнодобывающих и транспортных машин / А.Е. Козярук // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 261-261.
31. Кужеков, С.Л. Сравнительный анализ спектров модулей обобщенного вектора тока статора и мгновенных значений фазных токов при распознавании эксцентриситета ротора асинхронного электродвигателя / С.Л. Кужеков, В.А. Рогачев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 101-104.
32. Кузьмин, О.В. Анализ структуры гармонических рядов динамики на базе алгоритма сингулярного разложения / О.В. Кузьмин, В.С. Кедрин // Проблемы управления. – 2013. – № 1. – С. 26-31.
33. Левин, В.М. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию / В.М. Левин, Н.П. Гужов, Д.А. Боярова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – № 24 (1) – С. 39-51.

34. Мясовский, В.А. Исследование методов расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по данным каталога производителя // Молодой ученый. – 2020. – № 20 (310). – С. 127-133.
35. Назарычев, А.Н. Надежность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения: учебное пособие / А.Н. Назарычев, Д.С. Крупенёв. – Новосибирск: Наука. – 2020. – 224 с.
36. Новожилов, Т.А. Определение периода электрического сигнала в электроэнергетике для его спектрального анализа / Т.А. Новожилов, А.Н. Новожилов, А.О. Потапенко // ОНВ. – 2017. – №1 (151).
37. Пашке, М. Правовые аспекты новой энергетической политики Германии // Записки Горного института. – 2017. – 226. – С. 487.
38. Поршневу, С.В. Применение метода SSA для анализа технологической информации, собираемой информационным комплексом ТЭЦ / С.В. Поршневу, К.З. Аронсон, И.В. Соломаха // Известия ТПУ. – 2008. – №5.
39. Программа для измерения напряжения износа подшипника асинхронного двигателя по компонентам векторов Парка тока и напряжения / Н.И. Котелева, Н.А. Королёв, **А.Д. Булдыско** / Гос. регистр. Программы для ЭВМ. RU2022616081, 05.04.2022 Бюл. No 4. заявитель: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».
40. Программа распознавания наличия дефекта подшипника асинхронного двигателя / Ю.Л. Жуковский, **А.Д. Булдыско** / Гос. регистр. Программы для ЭВМ. RU2023660650, 23.05.2023 Бюл. No 6. заявитель: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».
41. Русов, В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов. – Пермь. – 1996. – № 1. – 176 с.
42. Русов, В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В.А. Русов. – Пермь. – 2012. – 252 с.
43. Сафин, Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: Дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01. – Екатеринбург. – 2017. – 152 с.

44. Смоловик, С.В., Халилов, Ф.Х. Анализ технического состояния электрических сетей 0,38-110 кВ Российской Федерации // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – №5.

45. Смольянов, И.А. Анализ КПД асинхронного двигателя в зависимости от технического состояния подшипников / И.А. Смольянов, Н.Р. Сафин, В.А. Прахт // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 4-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках выстав. «Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение» (Екатеринбург, 26-28 мая 2015 г.) / науч. ред. Ф. Н. Сарапулов. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2015. – С. 190-193.

46. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Министерство энергетики РФ.

47. Технические характеристики взрывозащищенных электродвигателей [Электронный ресурс]. – URL: <https://energomashs.ru/motors/vzd/vzriv-teh-har/> (дата обращения: 12.11.2022)

48. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]. – URL: <https://core.ac.uk/download/49217022.pdf> (дата обращения: 09.10.2022)

49. Асинхронный двигатель с совмещенными обмотками [Электронный ресурс] // ЭнергоСовет.ru. – URL: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=372 (дата обращения: 20.03.2023)

50. ГК «ЭЛЕКТРОМОТОР» [Электронный ресурс]. – URL: <https://nasoselprom.ru/upload/content/d/95280/d/dvig-rozn-vzr.pdf> (дата обращения: 20.03.2023)

51. Датчик напряжения LV 25-P/SP5. Технический паспорт. [Электронный ресурс]. – URL: <https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/lem/lv25-p-sp5.pdf> (дата обращения 14.05.2023)

52. Датчик тока LA 25-NP/SP44. Технический паспорт. [Электронный ресурс]. – URL:

https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/la_25_np_sp44.pdf (дата обращения 14.05.2023)

53. Информация о прогнозных свободных (нерегулируемых) ценах на электрическую энергию (мощность) на следующий месяц по субъектам Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.np-sr.ru/ru/activity/prognozy-sen/month/index.htm> (дата обращения: 20.03.2023)

54. Нефтегазопромысловое оборудование [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/8802976/#12> (дата обращения: 09.10.2022)

55. Поддержание пластового давления [Электронный ресурс]. – URL: <https://neftegaz.ru/science/booty/331582-podderzhanie-plastovogo-davleniya-ppd-na-neftyanykh-zalezhakh/> (дата обращения: 09.10.2022)

56. Показатель технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ) // Министерство энергетики России [Электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/11201> (дата обращения: 28.02.2021)

57. Развитие разрушений подшипников качения вследствие контактной усталости при качении [Электронный ресурс]. // Технический журнал SKF. – URL: <https://evolution.skf.com/ru/развитие-разрушений-подшипников-кач/> (дата обращения: 26.02.2023)

58. Расходы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в процентном отношении к валовому внутреннему продукту Российской Федерации (9.5.1) // ЕМИСС. Государственная статистика. – 2021 / [Электронный ресурс]. – URL: <https://fedstat.ru/indicator/58700> (дата обращения: 30.09.2021).

59. Резервуарные парки. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/2016/rezervuarnye-parki/> (дата обращения: 09.10.2022)

60. РУСЭЛПРОМ Владимирский электромоторный завод. Технический каталог. Асинхронные электродвигатели мощностью до 315 кВт. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ruselprom.ru/upload/iblock/550/vemz_catalog.pdf (дата обращения: 20.03.2023)

61. Справка: Оборудование и техника, используемые на различных этапах освоения морских нефтегазовых месторождений [Электронный ресурс]. – URL: <https://nangs.org/news/upstream/spravka-oborudovanie-i-tekhnika-ispolzuemye-nk-rosneft-na-razlichnykh-etapakh-osvoeniya-morskikh-neftegazovykh-mestorozhdenij-proekt-standarta-iso-gost-19906> (дата обращения: 09.10.2022)
62. Установки погружных винтовых электронасосов [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/8803149/> (дата обращения: 09.10.2022)
63. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 30.09.2021)
64. Abramovich, B.N. Protective Controller against Cascade Outages with Selective Harmonic Compensation Function / B.N. Abramovich, P.A. Kuznetsov, Yu.A. Sychev, // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Т. 1015. – №2.
65. Abu-Zeid, M.A. Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations / M.A. Abu-Zeid, S.M. Abdel-Rahman // Alexandria Engineering Journal. – 2013. – Т. 52. – № 3. – С. 241-248.
66. Adouni, A. Thermal Analysis of Low-Power Three-Phase Induction Motors Operating under Voltage Unbalance and Inter-Turn Short Circuit Faults / A. Adouni, A.J. Marques Cardoso // Machines. – 2021. – Т. 9. – № 1.
67. AlShorman, O. A Review of Artificial Intelligence Methods for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings for Induction Motor / O. AlShorman, M. Irfan, N. Saad, D. Zhen, N. Haider, A. Glowacz, A. AlShorman // Shock and Vibration. – 2020. – Т. 2020. – № e8843759.
68. Ayani, M. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning: 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems / M. Ayani, M. Ganebäck, A.H.C. Ng // Procedia CIRP. – 2018. – Т. 72. – С. 243-248.
69. Bahga, A. Blockchain Platform for Industrial Internet of Things / A. Bahga, V.K. Madiseti // Journal of Software Engineering and Applications. – 2016. – Т. 9. – № 10. – С. 533-546.

70. Barabady, J. Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran / J. Barabady, U. Kumar // Reliability Engineering & System Safety. – 2008. – T. 93. – № 4. – C. 647-653.
71. Blum, H. The challenging economics of energy security: Ensuring energy benefits in support to sustainable development / H. Blum, L.F.L. Legey // Energy Economics. – 2012. – T. 34. – № 6. – C. 1982-1989.
72. Brown, D.N. Machine-condition monitoring using vibration analysis / D.N. Brown, T. Jensen // Briel & Kjaer Application Note. – 1989.
73. Burgos Payán, M. Techno-economic optimal power rating of induction motors / M. Burgos Payán, J.M. Roldan Fernandez, J.M. Maza Ortega, J.M. Riquelme Santos // Applied Energy. – 2019. – T. 240. – C. 1031-1048.
74. Clarke, R. The information infrastructures of 1985 and 2018: The sociotechnical context of computer law & security / R. Clarke, M. Wigan // Computer Law & Security Review. – 2018. – T. 34. – № 4. – C. 677-700.
75. Cornell. E.P. Modeling and Design of Controlled Current Induction Motor Drive Systems / E.P. Cornell, T.A. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1977. – T. IA-13. – № 4. – C. 321-330.
76. Cui, L. Adaptive singular value decomposition for bearing fault diagnosis under strong noise interference / L. Cui, Y. Liu, D. Zhao // Measurement Science and Technology. – 2022. – T. 33. – № 9.
77. Deekshit Kompella K.C. Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques / K.C. Deekshit Kompella, M. Venu Gopala Rao, R. Srinivasa Rao // Ain Shams Engineering Journal. – 2018. – T. 9. – № 4. – C. 2427-2439
78. Desai, C.K. Drill Wear Monitoring using Artificial Neural Network with Differential Evolution Learning / C.K. Desai, A.A. Shaikh // 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology. – 2006. – C. 2019-2022.
79. Di Silvestre, M.L. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures / M.L. Di Silvestre, S. Favuzza,

E. Riva Sanseverino, G. Zizzo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Т. 93. – С. 483-498.

80. Дойников, А.Н. Методика прогнозирования нестационарных процессов в структурно неустойчивых системах / А.Н. Дойников, М.К. Сальникова, М.П. Калинин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2008. – № 2. – С. 119-123.

81. Benbouzid, M.E.H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2000. – Т. 47. – № 5. – С. 984-993

82. Das, A. Process monitoring and fault detection strategies: a review / A. Das, J. Maiti, R.N. Banerjee // *International Journal of Quality & Reliability Management*. – 2012. – Т. 29. – № 7. – С. 720-752.

83. Ercelebi, S.G. Optimization of shovel-truck system for surface mining / S.G. Ercelebi, A. Bascetin // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2009. – Т. 109. – № 7. – С. 433-439.

84. Feng, Y. Optimal energy management with balanced fuel economy and battery life for large hybrid electric mining truck / Y. Feng, Z. Dong // *Journal of Power Sources*. – 2020. – Т. 454.

85. Fenger, M. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis / M. Fenger, B.A. Lloyd, W.T. Thomson // *Cement Industry Technical Conference, 2003*. – 2003. – С. 37-46.

86. Ferreira F.J.T.E. Technical and economic considerations on induction motor oversizing / F.J.T.E. Ferreira, M. Cisneros-González, A.T. Almeida // *Energy Efficiency*. – 2016. – Т. 9. – № 1. – С. 1-25.

87. Filippov, E.V. Reproduction of reservoir pressure by machine learning methods and study of its influence on the cracks formation process in hydraulic fracturing / E.V. Filippov, L.A. Zakharov, D.A. Martyushev, I.N. Ponomareva // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Т. 258. – С. 924-932.

88. Fournier, E. Current-Based Detection of Mechanical Unbalance in an Induction Machine Using Spectral Kurtosis with Reference / E. Fournier, A. Picot,

J. Régnier, M. Yamdeu, J.-M. Andrejak, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – T. 62. – № 3. – C. 1879-1887.

89. Gangsar, P. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review / P. Gangsar, R. Tiwari // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – T. 144.

90. Garcia-Perez, A. The Application of High-Resolution Spectral Analysis for Identifying Multiple Combined Faults in Induction Motors / A. Garcia-Perez, R.J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R.A. Osornio-Rios // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – T. 58. – № 5. – C. 2002-2010.

91. Ghazali, M.H. Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review / M.H. Mohd Ghazali, W. Rahiman // Shock and Vibration. – 2021. – T. 2021.

92. Golyandina, N.E. 2D-extension of Singular Spectrum Analysis: algorithm and elements of theory / N.E. Golyandina, K.D. Usevich // Matrix methods: Theory, algorithms and applications. – 2010. – C. 449-473.

93. Golyandina N. Basic Singular Spectrum Analysis and forecasting with R / N. Golyandina, A. Korobeynikov // Computational Statistics & Data Analysis. – 2014. – T. 71. – C. 934-954.

94. Golyandina, N. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina, A. Korobeynikov, A. Shlemov, K. Usevich. // Journal of Statistical Software. – 2015. – T. 67. – № 2.

95. Golyandina, N. Particularities and commonalities of singular spectrum analysis as a method of time series analysis and signal processing / N. Golyandina // WIREs Computational Statistics. – 2020. – T. 12. – № 4.

96. Guo, M. Amplitude filtering characteristics of singular value decomposition and its application to fault diagnosis of rotating machinery / M. Guo, W. Li, Q. Yang, X. Zhao, Y. Tang // Measurement. – 2020. – T. 154.

97. Halme, J. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics – state of the art / J. Halme, P. Andersson // Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2010. – T. 224. – № 4. – C. 377-393.

98. Isham, M.F. Variational mode decomposition: mode determination method for rotating machinery diagnosis / M.F. Isham, M.S. Leong, M.H. Lim, Z.A. Ahmad // Journal of Vibroengineering. – 2018. – T. 20. – № 7. – C. 2604-2621.

99. Jonek-Kowalska, I. Efficiency of Enterprise Risk Management (ERM) systems. Comparative analysis in the fuel sector and energy sector on the basis of Central-European companies listed on the Warsaw Stock Exchange // Resources Policy. – 2019. – T. 62. – C. 405-415.

100. Kahr, M. Condition Monitoring of Ball Bearings Based on Machine Learning with Synthetically Generated Data / M. Kahr, G. Kovács, M. Loinig, H. Brückl, // Sensors. – 2022, – № 22.

101. Kessides, I.N. Towards a sustainable global energy supply infrastructure: Net energy balance and density considerations / I.N. Kessides, D.C. Wade // Energy Policy. – 2011. – T. 39. – № 9. – C. 5322-5334.

102. Khalyasmaa, A.I. Review of the Digital Twin Technology Applications for Electrical Equipment Lifecycle Management / A.I. Khalyasmaa, A.I. Stepanova, S.A. Eroshenko, P.V. Matrenin // Mathematics. – 2023. – №. 6.

103. Klyuev, R. Energy Indicators of Drilling Machines and Excavators in Mountain Territories / R. Klyuev, O. Fomenko, O. Gavrina, R. Turluev, S. Marzoev // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. – 2021. – C. 272-281.

104. Klyuev, R.V. Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review / R.V. Klyuev, I.D. Morgoev, A.D. Morgoeva, O.A. Gavrina, N.V. Martyushev, E.A. Efremenkov, Q. Mengxu // Energies. – 2022. – T. 15. – № 23.

105. Knoeri, C. End-user centred infrastructure operation: towards integrated end-use service delivery: Absolute Reductions in Material Throughput, Energy Use and Emissions / C. Knoeri, J.K. Steinberger, K. Roelich // Journal of Cleaner Production. – 2016. – T. 132. – C. 229-239.

106. Korolev, N. Efficiency Increase of Energy Systems in Oil and Gas Industry by Evaluation of Electric Drive Lifecycle / N. Korolev, A. Kozyaruk, V. Morenov // *Energies*. – 2021. – T. 14. – № 19.
107. Koteleva, N. A Soft Sensor for Measuring the Wear of an Induction Motor Bearing by the Park's Vector Components of Current and Voltage / N. Koteleva, N. Korolev, Y. Zhukovskiy, G. Baranov // *Sensors*. – 2021. – T. 21. – № 23.
108. Kumar, S. Vibration based fault diagnosis techniques for rotating mechanical components: review paper / S. Kumar, M. Lokesha, K. Kumar, K. Srinivas // *Proceedings of the International Conference on Advances in Manufacturing, Materials and Energy Engineering*. – 2018. – C. 1–6.
109. Kumar, R.R. A Comprehensive Review of Conventional and Intelligence-Based Approaches for the Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Induction Motors / R.R. Kumar, M. Andriollo, G. Cirrincione, M. Cirrincione, A. Tortella // *Energies*. – 2022. – T. 15. – № 23.
110. Lashari, S.Z. Drilling performance monitoring and optimization: a data-driven approach / S.Z. Lashari, A. Takbiri-Borujeni, E. Fathi, T. Sun, R. Rahmani, M. Khazaeli // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – T. 9. – № 4. – C. 2747-2756.
111. Lei, Y. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap / Y. Lei, B. Yang, X. Jiang, F. Jia, N. Li, A.K. Nandi // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – № 138.
112. Liang, L. Bearing fault diagnosis based on singular value distribution of impulse response segment / L. Liang, C. Liu, F. Liu // *ISA Transactions*. – 2023. – T. 134. – C. 511-528.
113. Liang, L. Feature Extraction Using Sparse Kernel Non-Negative Matrix Factorization for Rolling Element Bearing Diagnosis / L. Liang, X. Ding, F. Liu, Y. Chen, H. Wen // *Sensors*. – 2021. – T. 21. – № 11.
114. Liu, R. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review / R. Liu, B. Yang, E. Zio, X. Chen // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – № 108. – C. 33–47.

115. Mendes, A.M.S. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach / A.M.S. Mendes, A.J. Marques Cardoso // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. – 1999. – C. 704-706.
116. Merizalde, Y. State of the Art and Trends in the Monitoring, Detection and Diagnosis of Failures in Electric Induction Motors / Y. Merizalde, L. Hernández-Callejo, O. Duque-Perez // Energies. – 2017. – T. 10. – № 7. – C. 1056.
117. Mia, Y. Application of improved reweighted singular value decomposition for gearbox fault diagnosis based on built-in encoder information / Y. Miao, B. Zhang, Y. Yi, J. Lin // Measurement. – 2021. – T. 168. – C. 108295.
118. Mitchell, Z. A Statistical Analysis of Construction Equipment Repair Costs Using Field Data and the Cumulative Cost Model. Doctoral Dissertation. Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA. – 1998.
119. Mostafaei, M. An overview of various faults detection methods in synchronous generators / M. Mostafaei, J. Faiz // IET Electric Power Applications. – 2021. – T. 15. – № 4. – C. 391-404.
120. Mustafa, M.O. Faults Classification Scheme for Three Phase Induction Motor / M.O. Mustafa, G. Nikolakopoulos, T. Gustafsson // International Journal of System Dynamics Applications. – 2014. – T. 3. – № 1. – C. 1-20.
121. Muthukumaran, S. Bearing Fault Detection in Induction Motors Using Line Currents / S. Muthukumaran, A. Rammohan, S. Sekar, M. Maiti, K. Bingi // ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications. – 2021. – T. 19. – № 2. – C. 209-219.
122. Nikolaev, A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption / A.V. Nikolaev, S. Vöth, A.V. Kychkin. // Journal of Mining Institute. – 2023. – T. 261, – C. 403-414.
123. OREDA. Offshore Reliability: Data handbook 4th edition. ISBN 82-14-02705-5. 2002

124. Pleskach, B. Estimation of Hidden Energy Losses // Electric Power Conversion and Micro-Grids. IntechOpen. – 2021.
125. Ranjan, R. Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: a case study / R. Ranjan, S.K. Ghosh, M. Kumar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2020. – T. 234. – № 3. – C. 235–242.
126. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – T. IA-21. – № 4. – C. 853-864.
127. Revin, I. Automated machine learning approach for time series classification pipelines using evolutionary optimization / I. Revin, V.A. Potemkin, N.R. Balabanov, N.O. Nikitin // Knowledge-Based Systems. – 2023. – T. 268. – 110483.
128. Reyes-Malanche J.A. Short-Circuit Fault Diagnosis on Induction Motors through Electric Current Phasor Analysis and Fuzzy Logic / J.A. Reyes-Malanche, F.J. Villalobos-Pina, E. Ramirez-Velasco et al. // Energies. – 2023. – T. 16. – № 1. – P. 516
129. Salama, A. Optimization of Truck-Loader haulage system in an underground mine: A simulation approach using SimMine / A. Salama, J. Greberg // Conference: In the proceedings of the 6th Conference and Exhibition International on Mass Mining. – 2012.
130. Saucedo-Dorantes, J.J. Multiple-Fault Detection Methodology Based on Vibration and Current Analysis Applied to Bearings in Induction Motors and Gearboxes on the Kinematic Chain / J.J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, J.A. Ortega-Redondo, R.A. Osornio-Rios, R. J. Romero-Troncoso // Shock and Vibration. – 2016. – T. – 2016. – № e5467643.
131. Shabalov, M.Yu. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector / M.Yu. Shabalov, Yu.L. Zhukovskiy, **A.D. Buldysko**, V.V. Starshaia, B. Gil // Energy Reports. – 2021. – T. 7. – C. 2664-2680.
132. Silva, J.L.H. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach / J.L.H. Silva, A.J.M. Cardoso // 31st Annual

Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2005. – 2005. – C. 2591-2596.

133. Sintoni, M. Condition Monitoring of Induction Machines: Quantitative Analysis and Comparison / M. Sintoni, E. Macrelli, A. Bellini, C. Bianchini // *Sensors*. – 2023. – T. 23. – № 1046.

134. Skamyin, A. An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters / A. Skamyin, Y. Shklyarskiy, I. Dobush, V. Dobush, T. Sutikno, M.H. Jopri // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. – 2022. – T. 13. – № 2. – C. 950-959.

135. Sung, Y.-T. The effects of integrating mobile devices with teaching and learning on students' learning performance: A meta-analysis and research synthesis / Y.-T. Sung, K.-E. Chang, T.-C. Liu // *Computers & Education*. – 2016. – T. 94. – C. 252-275.

136. Tcvetkov, P. Economic assessment of heat and power generation from small-scale liquefied natural gas in Russia: The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering / P. Tcvetkov, A. Cherepovitsyn, A. Makhovikov // *Energy Reports*. – 2020. – T. 6. – C. 391-402.

137. Tcvetkov, P. Engagement of resource-based economies in the fight against rising carbon emissions // *Energy Reports*. – 2022. – T. 8, – C. 874–883.

138. *The Global Electric Vehicle Market in 2020: Statistics & Forecasts*; Virta: Helsinki, Finland, 2020.

139. Thomson, W. Vibration Monitoring of Induction Motors and Case Histories on Shaft Misalignment and Soft Foot. In *Vibration Monitoring of Induction Motors: Practical Diagnosis of Faults via Industrial Case Studies* // Cambridge: Cambridge University Press. – 2020. – C. 1-46.

140. 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.

141. Vathoopan, M. Modular Fault Ascription and Corrective Maintenance Using a Digital Twin: 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in

Manufacturing INCOM 2018 / M. Vathoopan, M. Johny, A. Zoitl, A. Knoll // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – T. 51. – № 11. – C. 1041-1046.

142. Wang, H. A Compound Fault Diagnosis for Rolling Bearings Method Based on Blind Source Separation and Ensemble Empirical Mode Decomposition / H. Wang, R. Li, G. Tang, H. Yuan, Q. Zhao, X. Cao // PLoS ONE. – 2014, – T. 9. – № e109166.

143. Wang, R. Selection of window length for singular spectrum analysis. / R. Wang, H.-G. Ma, G.-Q. Liu, D.-G. Zuo // Journal of the Franklin Institute. – 2015. – T. 352. – № 4. – C. 1541–1560.

144. Xu, L. A Tachless Order Tracking Method Based on Inverse Short Time Fourier Transform and Singular Value Decomposition for Bearing Fault Diagnosis / L. Xu, S. Chatterton, P. Pennacchi, C. Liu // Sensors. – 2020. – T. 20. – № 23.

145. Yoo, Y.-J. Fault Detection of Induction Motor Using Fast Fourier Transform with Feature Selection via Principal Component Analysis // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2019. – T. 20. – № 9. – C. 1543-1552.

146. Zakoldaev, D.A. Application of imitation modelling means to create digital twins of the Industry 4.0 company technological equipment / D.A. Zakoldaev, A.V. Gurjanov, D.R. Kochubey, I.O. Zharinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – T. 450. – № 3.

147. Zemenkova, M.Y. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies / M.Y. Zemenkova, E.L. Chizhevskaya, Y.D. Zemenkov // Journal of Mining Institute. – 2022. – T. 258. – C. 933-944.

148. Zhao, H. A New Feature Extraction Method Based on EEMD and Multi-Scale Fuzzy Entropy for Motor Bearing / H. Zhao, M. Sun, W. Deng, X. Yang // Entropy. – 2017. – T. 19. – № 1.

149. Zhao, X. Feature frequency extraction algorithm based on the singular value decomposition with changed matrix size and its application in fault diagnosis / X. Zhao, B. Ye // Journal of Sound and Vibration. – 2022. – T. 526. – C. 116848

150. Zhao, J. Overview of Equipment Health State Estimation and Remaining Life Prediction Methods / J. Zhao, C. Gao, T. Tang, X. Xiao, M. Luo, B. Yuan // – Machines. – 2022. – T. 10. – № 422.

151. Zheng, P. Health Status-Based Predictive Maintenance Decision-Making via LSTM and Markov Decision Process / P. Zheng, W. Zhao, Y. Lv, L. Qian, Y. Li // – Mathematics. – 2023. – T.11. – № 1.

152. Zhongya, Z. Prediction of Peak Velocity of Blasting Vibration Based on Artificial Neural Network Optimized by Dimensionality Reduction of FA-MIV / Z. Zhongya, J. Xiaoguang // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – T. 2018. – № e8473547.

153. Zhuang, C. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor / C. Zhuang, J. Liu, H. Xiong // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – T. 96. – № 1. – C. 1149-1163.

154. Zhukovskiy, Y.L. Analysis of Technological Changes in Integrated Intelligent Power Supply Systems / Y.L. Zhukovskiy, V.V. Starshaia, D.E. Batueva, **A.D. Buldysko** // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects: Proceedings of the 11th Russian-German Raw Materials Conference, November 7-8. – 2018. – № 1. – C. 249-258.

155. Zhukovskiy, Y.L. Analysis of the Behavior of Asynchronous Electric Drive with a Closed Scalar Control System when Changing the Inductance of the Magnetizing Circuit / Y.L. Zhukovskiy, B.Y. Vasiliev, N.A. Korolev, Y.M. Malkova // Indonesian Journal of Science and Technology. – 2022. – № 8. – C. 65-78.

156. Zhukovskiy, Y. Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current / Y. Zhukovskiy, **A. Buldysko**, I. Revin // Energies. – 2023. – T. 16. – № 8.

157. Zhukovskiy, Y.L. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios / Y.L. Zhukovskiy, D.E. Batueva, **A.D. Buldysko**, V.V. Starshaia, B. Gil // Energies. – 2021. – T. 14. – № 17.

158. Zhukovskiy, Y. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, **A. Buldysko**, M. Shabalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1333, № – 6.

159. Zhukovskiy, Y. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic / Yu. Zhukovskiy, **A. Buldysko**, Y. Malkova, A. Koshenkova, A. Stoianova, P. Tsvetkov // Resources. – 2021. – Т. 10. – № 12.

160. Zhukovsky, Y.L. The development and use of diagnostic systems and estimation of residual life in industrial electrical equipment / Y.L. Zhukovsky, B.U. Vasiliev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Т. 10. – № 20. – С. 41150-41155.

161. Zhukovskiy, Yu.L. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / Yu.L. Zhukovskiy, N.A. Korolev, I.S. Babanova, A.V. Boikov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science – 2017. – №87 (032056).

162. Zhukovskiy, Yu.L. The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics / Yu.L. Zhukovskiy, N.A. Korolev, I.S. Babanova, A.V. Boikov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – №87 (032055).

163. A call to action on efficient and smart appliances – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. – URL: <https://www.iea.org/articles/a-call-to-action-on-efficient-and-smart-appliances> (дата обращения: 28.02.2021).

164. Bearing damage and failure analysis [Электронный ресурс]. // Технический журнал SKF. – URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf (дата обращения: 26.02.2023)

165. Damage to rolling bearings and their cause. [Электронный ресурс] // Технический журнал SKF. – URL: https://www.promshop.info/cataloguespdf/reasons_damage_bearings.pdf (дата обращения 24.11.2022)

166. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems – Analysis [Электронный ресурс]. // IEA. – URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems> (дата обращения: 28.02.2021).

167. Global AC Electric Motor Sales in Oil and Gas Market Report and Forecast 2023-2028. [Электронный ресурс] // Expert Market Research. – URL: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/ac-electric-motor-sales-in-oil-and-gas-market> (дата обращения: 16.02.2023).

168. Global Energy Review. 2020 г. [Электронный ресурс] // IEA. – URL: <https://www.iea.org/reports/> (дата обращения: 28.02.2021).

169. Global EV Outlook 2019 – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. – URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019> (дата обращения: 28.02.2021).

170. Global Infrastructure Hub – A G20 Initiative. [Электронный ресурс] // Global Infrastructure Hub. – URL: <https://www.gihub.org/> (дата обращения: 27.02.2021).

171. IEA 2015 4E: Energy efficiency roadmap for electric motors and motor systems [Электронный ресурс] – URL: <https://www.iea-4e.org/document/378/energy-efficiency-roadmap-for-electric-motors-and-motor-systems> (дата обращения: 16.02.2023).

172. Induction Motor Market Share [Электронный ресурс] // Mordor Intelligence. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/induction-motor-market/market-share> (дата обращения: 16.02.2023).

173. Mais J. Spectrum Analysis. The key features of analyzing spectra. [Электронный ресурс]. // Технический журнал SKF. – URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024acef-CM5118-EN-Spectrum-Analysis_tcm_12-113997.pdf (дата обращения 26.02.2023)

174. Motor-driven system electricity use as a share of electricity use by industry subsector – Charts – Data & Statistics [Электронный ресурс]. // IEA. – URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/motor-driven-system-electricity-use-as-a-share-of-electricity-use-by-industry-subsector> (дата обращения: 16.02.2023).

175. New EU rules to boost energy efficiency of electric motors [Электронный ресурс]. – URL: https://commission.europa.eu/news/new-eu-rules-boost-energy-efficiency-electric-motors-2021-06-30_en (дата обращения: 13.05.2022).

176. Scenarios for the Energy Transition: Global experience and best practices [Электронный ресурс] // IRENA. – URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Scenarios-for-the-Energy-Transition-Global-experience-and-best-practices> (дата обращения: 28.02.2021).

177. World Energy Outlook 2019. [Электронный ресурс] // IEA. – URL: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2019> (дата обращения: 28.02.2021).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Оценка вкладов компонент

Таблица А.1 – Результаты пофазного расчета вклада компонент при номинальной нагрузке для экспериментов типа «несоосность» и «ослабление креплений»

X_i	Нормальное состояние	Ослабление креплений			Несоосность	
		Переднее левое (ПЛ)	Переднее правое (ПП)	Переднее правое, заднее правое (ПП+ЗП)	1 стадия (3%)	2 стадия (6%)
Фаза А						
0	52,03099	56,34088	55,38182	55,9613	56,56623	56,57052
1	47,56697	43,21769	44,24839	43,66704	42,82475	42,71301
2	0,092882	0,121554	0,099075	0,109366	0,13952	0,134245
3	0,087906	0,111106	0,095446	0,104161	0,12596	0,124465
4	0,017888	0,056289	0,044229	0,041576	0,081094	0,089132
5	0,015649	0,032866	0,0197	0,035018	0,065195	0,081133
6	0,01424	0,032332	0,018805	0,034794	0,044711	0,072125
7	0,013765	0,012887	0,015527	0,005829	0,029515	0,061153
8	0,010485	0,008671	0,013085	0,005029	0,023423	0,058592
9	0,009881	0,006792	0,011609	0,004573	0,022886	0,030812
10	0,009186	0,00446	0,007726	0,00314	0,008705	0,009113
11	0,007117	0,00249	0,006894	0,002922	0,00809	0,008793
Фаза В						
0	55,71097	52,37752	52,29158	55,95316	52,73245	53,1296
1	44,02235	47,45357	47,52125	43,86311	46,89287	46,3842
2	0,022539	0,027604	0,03299	0,033441	0,072539	0,082812
3	0,020612	0,026591	0,032293	0,031783	0,061552	0,079764
4	0,017315	0,02545	0,017388	0,023481	0,049362	0,070131
5	0,015889	0,014775	0,013547	0,019705	0,040971	0,055323
6	0,01473	0,014435	0,010816	0,019148	0,024959	0,052415
7	0,014075	0,011536	0,00952	0,00559	0,023513	0,037231
8	0,008638	0,008643	0,008013	0,005388	0,020786	0,025787
9	0,007661	0,007275	0,00798	0,005128	0,01891	0,024811
10	0,003815	0,006218	0,007152	0,00492	0,011798	0,009888
11	0,003649	0,006159	0,006475	0,004357	0,011184	0,009808

Продолжение Таблицы А.1

Фаза С						
0	56,12405	54,96787	56,13211	51,78739	54,40872	53,73915
1	43,31244	44,40945	43,30615	47,59282	44,80328	45,27224
2	0,187012	0,262267	0,234398	0,253881	0,250703	0,262458
3	0,176883	0,241894	0,228051	0,242259	0,22886	0,242656
4	0,018215	0,019784	0,015017	0,026603	0,054488	0,102556
5	0,017438	0,019106	0,013588	0,025798	0,046544	0,087819
6	0,016287	0,00867	0,013001	0,006716	0,041255	0,0705
7	0,01287	0,008184	0,011701	0,005829	0,027184	0,060126
8	0,007926	0,005126	0,009922	0,005711	0,026312	0,05135
9	0,00572	0,005066	0,006564	0,005556	0,025782	0,035033
10	0,005185	0,004976	0,003716	0,004668	0,022962	0,011742
11	0,005115	0,004305	0,003681	0,004214	0,022593	0,011387

Таблица А.2 – Результаты пофазного расчета вклада компонент в режиме холостого хода для экспериментов типа «несоосность» и «ослабление креплений»

X_i	Нормальное состояние	Ослабление креплений			Несоосность	
		Переднее левое (ПЛ)	Переднее правое (ПП)	Переднее правое, заднее правое (ПП+ЗП)	1 стадия (3%)	2 стадия (6%)
Фаза А						
0	52,26819	52,50705	56,31854	56,3489	52,2933	56,24055
1	47,47801	47,07778	43,29768	43,25598	46,89357	43,42973
2	0,090913	0,129776	0,117704	0,097046	0,156835	0,117623
3	0,087242	0,122707	0,111133	0,091343	0,13842	0,112313
4	0,016094	0,052869	0,037692	0,046431	0,134236	0,016832
5	0,015484	0,03473	0,035051	0,045046	0,128248	0,015049
6	0,011074	0,033458	0,034199	0,044927	0,093232	0,01456
7	0,007334	0,007118	0,006801	0,012046	0,058904	0,008655
8	0,007191	0,005833	0,006621	0,01164	0,020363	0,007031
9	0,003759	0,004877	0,006197	0,009527	0,019499	0,00598
10	0,00368	0,003383	0,005089	0,009353	0,013658	0,005586
11	0,002893	0,003324	0,004117	0,008819	0,012916	0,003618

Продолжение Таблицы А.2

Фаза В						
0	56,55885	56,66259	52,19858	52,27254	56,55022	52,10782
1	43,29518	43,16639	47,64221	47,53404	42,91345	47,71247
2	0,039834	0,03358	0,03038	0,029165	0,152261	0,037838
3	0,037679	0,03118	0,028781	0,027351	0,115523	0,035331
4	0,019856	0,018105	0,015336	0,024543	0,089036	0,030466
5	0,012802	0,01686	0,014865	0,023484	0,054508	0,010835
6	0,012132	0,016589	0,012309	0,021225	0,024265	0,009782
7	0,004868	0,009981	0,011427	0,012141	0,021539	0,007911
8	0,004707	0,007359	0,01127	0,010735	0,019931	0,007355
9	0,002482	0,007022	0,007483	0,010604	0,011492	0,007279
10	0,002456	0,006317	0,006532	0,009075	0,010883	0,006297
11	0,001928	0,004124	0,003725	0,008577	0,007674	0,004658
Фаза С						
0	55,32628	54,8704	55,23741	55,01851	54,72782	55,4195
1	44,15225	44,47213	44,16447	44,40999	44,32942	43,95114
2	0,228001	0,288344	0,254909	0,223649	0,20472	0,265618
3	0,218731	0,271972	0,240916	0,210346	0,197769	0,254327
4	0,012887	0,020561	0,024367	0,032954	0,149597	0,022194
5	0,012625	0,020079	0,024043	0,032386	0,128648	0,011243
6	0,012165	0,00719	0,008984	0,012762	0,084029	0,010276
7	0,009577	0,006775	0,008783	0,010344	0,062502	0,010021
8	0,00939	0,006742	0,005988	0,009298	0,021615	0,008463
9	0,0056	0,006209	0,005875	0,008275	0,021164	0,007873
10	0,005553	0,006079	0,00566	0,008128	0,016498	0,006889
11	0,001188	0,0059	0,00521	0,005997	0,01485	0,00634

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты группировки компонент

Таблица Б.1 – Результаты группировки компонент при пофазном расчете вкладов при номинальной нагрузке для экспериментов типа «несоосность» и «ослабление креплений»

Нормальное состояние	Ослабление креплений			Несоосность	
	Переднее левое (ПЛ)	Переднее правое (ПП)	Переднее правое, заднее правое (ПП+ЗП)	1 стадия (3%)	2 стадия (6%)
Фаза А					
Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 7, 8, 9, 10] Группа 4: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6, 7] Группа 3: [8, 9] Группа 4: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6, 9] Группа 3: [7, 8] Группа 4: [10, 11]
Фаза В					
Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 8, 9] Группа 3: [6, 7] Группа 4: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4] Группа 2: [5, 6] Группа 3: [7, 8, 9] Группа 4: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 9] Группа 5: [8, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 9] Группа 5: [8, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4, 5] Группа 2: [6, 7, 8, 9] Группа 4: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6] Группа 3: [7, 8, 9] Группа 4: [10, 11]
Фаза С					
Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 7] Группа 4: [8, 9] Группа 5: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 7, 8, 9] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 10, 11] Группа 4: [7, 8, 9]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 10, 11] Группа 4: [7, 8, 9]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6] Группа 3: [7, 8, 9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6, 7] Группа 3: [8, 9] Группа 4: [10, 11]

Таблица Б.2 – Результаты группировки компонент при пофазном расчете вкладов в режиме холостого хода для экспериментов типа «несоосность» и «ослабление креплений»

Нормальное состояние		Ослабление креплений			Несоосность	
		Переднее левое (ПЛ)	Переднее правое (ПП)	Переднее правое, заднее правое (ПП+ЗП)	1 стадия (3%)	2 стадия (6%)
Фаза А						
Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6] Группа 4: [7, 8] Группа 5: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 9] Группа 5: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6] Группа 3: [7, 8] Группа 4: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4, 5, 6, 7] Группа 2: [8, 9] Группа 3: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4, 5, 6] Группа 2: [7, 8, 9] Группа 3: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8, 9] Группа 5: [11]
Фаза В						
Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 6] Группа 4: [7, 8] Группа 5: [9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6] Группа 3: [7, 8, 9, 10] Группа 4: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6] Группа 4: [7, 8, 9] Группа 5: [10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4, 5] Группа 2: [6, 7, 8] Группа 3: [9, 10] Группа 4: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4, 5] Группа 2: [6, 7, 8] Группа 3: [9, 10] Группа 4: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4] Группа 2: [5, 6] Группа 3: [7, 8, 9] Группа 4: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3, 4] Группа 2: [5, 6] Группа 3: [7, 8, 9] Группа 4: [11]
Фаза С						
Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6, 7, 8] Группа 3: [9, 10] Группа 4: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6] Группа 4: [7, 8, 9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5] Группа 3: [6, 7] Группа 4: [8, 9, 10] Группа 5: [11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6, 7] Группа 3: [8, 9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4, 5, 6, 7] Группа 3: [8, 9, 10, 11]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 10, 11] Группа 4: [6, 7] Группа 5: [8, 9]	Тренд: [0, 1] Группа 1: [2, 3] Группа 2: [4] Группа 3: [5, 10, 11] Группа 4: [6, 7] Группа 5: [8, 9]

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Экономический расчет

Таблица В.1 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 1,5$ кВт при $p_E = 1,2$ руб/кВт· $k_d = 5\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОНР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MPO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MPO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MPO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MPO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				483226,03	675012,72	6,1	71,59	64,53	61,82	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	41147,23	435601,64	627388,33	6,56	77,02	69,43	66,52	
	0,2				417313,06	609099,74	6,76	79,33	71,52	68,51	
0,05	0,05				483226,03	676642,31	6,32	71,42	64,38	61,67	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	42776,82	435601,64	629017,92	6,8	76,82	69,25	66,34	
	0,2				417313,06	610729,34	7	79,12	71,32	68,33	
0,10	0,05				483226,03	678679,3	6,6	71,2	64,18	61,49	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	44813,81	435601,64	631054,91	7,1	76,57	69,03	66,13	
	0,2				417313,06	612766,33	7,31	78,86	71,09	68,1	
0,50	0,05				483226,03	694975,24	8,79	69,53	62,68	60,05	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	61109,75	435601,64	647350,85	9,44	74,65	67,29	64,46	
	0,2				417313,06	629062,26	9,71	76,82	69,25	66,34	
1,00	0,05				483226,03	715345,15	11,39	67,55	60,89	58,34	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	81479,66	435601,64	667720,76	12,2	72,37	65,24	62,5	
	0,2				417313,06	649432,18	12,55	74,41	67,07	64,26	
2,00	0,05				483226,03	756084,98	16,16	63,91	57,61	55,19	109,3
	0,1	9811,85	20442,95	122219,5	435601,64	708460,59	17,25	68,21	61,49	58,9	
	0,2				417313,06	690172,01	17,71	70,02	63,11	60,47	

Таблица В.2 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{НОМ} = 1,5$ кВт при $p_E = 1,7$ руб/кВт· $k_d = 5\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТЮиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MPO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MPO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MPO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MPO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{НОМ}}$
0,01	0,05				483226,03	747334,18	7,8	64,66	58,29	55,84	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	58291,91	435601,64	699709,79	8,33	69,06	62,25	59,64	
	0,2				417313,06	681421,2	8,55	70,91	63,93	61,24	
0,05	0,05				483226,03	749642,77	8,08	64,46	58,11	55,67	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	60600,5	435601,64	702018,38	8,63	68,83	62,05	59,44	
	0,2				417313,06	683729,79	8,86	70,68	63,71	61,03	
0,10	0,05				483226,03	752528,5	8,44	64,21	57,89	55,45	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	63486,24	435601,64	704904,11	9,01	68,55	61,8	59,2	
	0,2				417313,06	686615,53	9,25	70,38	63,44	60,78	
0,50	0,05				483226,03	775614,41	11,16	62,3	56,16	53,8	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	86572,14	435601,64	727990,02	11,89	66,38	59,84	57,32	
	0,2				417313,06	709701,43	12,2	68,09	61,38	58,8	
1,00	0,05				483226,03	804471,79	14,35	60,07	54,15	51,87	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	115429,5	435601,64	756847,4	15,25	63,85	57,55	55,14	
	0,2				417313,06	738558,81	15,63	65,43	58,98	56,5	
2,00	0,05				483226,03	417313,87	41,49	115,79	104,38	100	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	173144,3	435601,64	814562,16	21,26	59,32	53,48	51,23	
	0,2				417313,06	796273,57	21,74	60,69	54,71	52,41	

Таблица В.3 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{НОМ} = 1,5$ кВт при $p_E = 2,5$ руб/кВт· $k_d = 5\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{НОМ}}$
0,01	0,05				483226,03	863048,51	9,93	55,99	50,47	48,35	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	85723,39	435601,64	815424,12	10,51	59,26	53,42	51,18	
	0,2				417313,06	797135,53	10,75	60,62	54,65	52,35	
0,05	0,05				483226,03	866443,49	10,29	55,77	50,27	48,16	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	89118,38	435601,64	818819,1	10,88	59,01	53,2	50,97	
	0,2				417313,06	800530,52	11,13	60,36	54,41	52,13	
0,10	0,05				483226,03	870687,22	10,72	55,5	50,03	47,93	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	93362,11	435601,64	823062,83	11,34	58,71	52,92	50,7	
	0,2				417313,06	804774,25	11,6	60,04	54,13	51,85	
0,50	0,05				483226,03	904637,08	14,07	53,42	48,15	46,13	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	127311,9	435601,64	857012,69	14,86	56,38	50,83	48,69	
	0,2				417313,06	838724,11	15,18	57,61	51,94	49,76	
1,00	0,05				483226,03	947074,41	17,92	51,02	45,99	44,06	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	169749,3	435601,64	899450,02	18,87	53,72	48,43	46,4	
	0,2				417313,06	881161,43	19,26	54,84	49,43	47,36	
2,00	0,05				483226,03	417314,04	61,01	115,79	104,38	100	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	254623,9	435601,64	984324,66	25,87	49,09	44,25	42,4	
	0,2				417313,06	966036,08	26,36	50,02	45,09	43,2	

Таблица В.4 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 1,5$ кВт при $p_E = 1,2$ руб/кВт· $k_d = 10\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				322911,8	472701,31	6,6	78,99	71,21	68,31	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	31191,29	373407	524431,82	6,18	71,2	64,18	61,57	
	0,2				336605,84	487630,65	6,65	76,58	69,03	66,22	
0,05	0,05				322911,8	473936,61	6,84	78,79	71,02	68,13	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	32426,59	373407	525975,94	6,46	70,99	64	61,39	
	0,2				336605,84	489174,78	6,94	76,33	68,81	66,01	
0,10	0,05				322911,8	475480,73	7,14	78,53	70,79	67,91	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	33970,71	373407	538328,93	8,61	69,36	62,53	59,98	
	0,2				336605,84	501527,76	9,24	74,45	67,12	64,39	
0,50	0,05				322911,8	487833,72	9,5	76,54	69	66,19	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	46323,7	373407	553770,16	11,15	67,43	60,78	58,31	
	0,2				336605,84	516969	11,95	72,23	65,11	62,46	
1,00	0,05				322911,8	503274,95	12,27	74,2	66,88	64,16	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	61764,93	373407	417313,61	22,2	89,48	80,66	77,38	
	0,2				336605,84	547851,46	16,91	68,16	61,44	58,94	
2,00	0,05				322911,8	534157,42	17,34	69,91	63,02	60,45	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	92647,4	322911,8	472701,31	6,6	78,99	71,21	68,31	
	0,2				373407	524431,82	6,18	71,2	64,18	61,57	

Таблица В.5 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 1,5$ кВт при $p_E = 1,7$ руб/кВт· $k_d = 10\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				373407	578019,16	7,64	64,6	58,23	55,87	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	44187,66	336605,84	541217,99	8,16	68,99	62,19	59,66	
	0,2				322911,8	527523,95	8,38	70,78	63,81	61,21	
0,05	0,05				373407	579769,16	7,92	64,41	58,06	55,7	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	45937,67	336605,84	542968	8,46	68,77	61,99	59,47	
	0,2				322911,8	529273,95	8,68	70,55	63,6	61,01	
0,10	0,05				373407	581956,67	8,27	64,16	57,84	55,49	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	48125,18	336605,84	545155,51	8,83	68,5	61,74	59,23	
	0,2				322911,8	531461,46	9,06	70,26	63,34	60,76	
0,50	0,05				373407	599456,73	10,95	62,29	56,15	53,87	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	65625,24	336605,84	562655,57	11,66	66,37	59,82	57,39	
	0,2				322911,8	548961,53	11,95	68,02	61,32	58,82	
1,00	0,05				373407	621331,81	14,08	60,1	54,17	51,97	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	87500,32	336605,84	584530,65	14,97	63,88	57,59	55,24	
	0,2				322911,8	570836,61	15,33	65,41	58,97	56,57	
2,00	0,05				373407	322912,42	40,65	115,64	104,24	100	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	131250,5	336605,84	628280,81	20,89	59,43	53,58	51,4	
	0,2				322911,8	614586,77	21,36	60,76	54,77	52,54	

Таблица В.6 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{НОМ} = 1,5$ кВт при $p_E = 2,5$ руб/кВт· $k_d = 10\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	$C_{P_{REL}}$, руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{P_{REL}}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{НОМ}}$
0,01	0,05				373407	665735,37	9,76	56,09	50,56	48,5	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	64981,85	336605,84	628934,21	10,33	59,37	53,52	51,34	
	0,2				322911,8	615240,17	10,56	60,69	54,71	52,49	
0,05	0,05				373407	417313,69	16,19	89,48	80,66	77,38	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	67555,39	336605,84	631507,75	10,7	59,13	53,3	51,13	
	0,2				322911,8	617813,71	10,93	60,44	54,48	52,27	
0,10	0,05				373407	671525,84	10,54	55,61	50,13	48,09	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	70772,32	336605,84	634724,67	11,15	58,83	53,03	50,87	
	0,2				322911,8	621030,63	11,4	60,13	54,2	52	
0,50	0,05				373407	697261,22	13,84	53,55	48,28	46,31	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	96507,7	336605,84	660460,06	14,61	56,54	50,97	48,89	
	0,2				322911,8	646766,02	14,92	57,73	52,04	49,93	
1,00	0,05				373407	417313,75	30,83	89,48	80,66	77,38	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	128676,9	336605,84	692629,29	18,58	53,91	48,6	46,62	
	0,2				322911,8	678935,25	18,95	55	49,58	47,56	
2,00	0,05				373407	322912,55	59,77	115,64	104,24	100	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	193015,4	336605,84	756967,76	25,5	49,33	44,47	42,66	
	0,2				322911,8	743273,72	25,97	50,24	45,29	43,44	

Таблица В.7 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{НОМ} = 1,5$ кВт при $p_E = 1,2$ руб/кВт· $k_d = 15\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{НОМ}}$
0,01	0,05				297653,58	419217,94	5,84	71	64	61,49	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	24500,17	268318,3	389882,66	6,28	76,34	68,82	66,12	
	0,2				257793,58	379357,94	6,46	78,46	70,73	67,96	
0,05	0,05				297653,58	417313,45	6,39	71,33	64,3	61,77	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	25470,48	268318,3	390852,96	6,83	76,15	68,65	65,96	
	0,2				257793,58	380328,24	7,02	78,26	70,55	67,78	
0,10	0,05				297653,58	421401,12	6,33	70,63	63,67	61,18	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	26683,36	268318,3	392065,84	6,81	75,92	68,44	65,75	
	0,2				257793,58	381541,12	6,99	78,01	70,32	67,57	
0,50	0,05				297653,58	431104,16	8,44	69,04	62,24	59,8	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	36386,4	268318,3	401768,88	9,06	74,09	66,78	64,16	
	0,2				257793,58	391244,16	9,3	76,08	68,58	65,89	
1,00	0,05				297653,58	417313,47	17,44	71,33	64,3	61,77	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	48515,19	268318,3	413897,68	17,58	71,91	64,83	62,28	
	0,2				257793,58	403372,96	18,04	73,79	66,52	63,91	
2,00	0,05				297653,58	417313,5	17,44	71,33	64,3	61,77	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	72772,79	268318,3	438155,28	16,61	67,93	61,24	58,84	
	0,2				257793,58	427630,56	17,02	69,61	62,75	60,28	

Таблица В.8 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 1,5$ кВт при $p_E = 1,7$ руб/кВт· $k_d = 15\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				297653,58	462280,09	7,51	64,39	58,04	55,77	36,81
	0,1	3303,32	13934,42	34708,58	268318,3	432944,81	8,02	68,75	61,98	59,54	
	0,2				257793,58	422420,09	8,22	70,46	63,52	61,03	
0,05	0,05				297653,58	417313,49	9,06	71,33	64,3	61,77	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	36083,18	268318,3	434319,41	8,7	68,53	61,78	59,36	
	0,2				257793,58	423794,69	8,92	70,24	63,31	60,83	
0,10	0,05				297653,58	465372,93	8,12	63,96	57,66	55,4	40,09
	0,1	3597,68	14228,78	37801,42	268318,3	436037,65	8,67	68,26	61,54	59,12	
	0,2				257793,58	425512,94	8,88	69,95	63,06	60,58	
0,50	0,05				297653,58	417313,51	12,35	71,33	64,3	61,77	54,67
	0,1	4905,93	15537,03	51547,39	268318,3	449783,63	11,46	66,18	59,65	57,32	
	0,2				257793,58	439258,91	11,74	67,76	61,08	58,69	
1,00	0,05				297653,58	417313,52	24,7	71,33	64,3	61,77	72,89
	0,1	6541,24	17172,34	68729,86	268318,3	466966,09	22,08	63,74	57,46	55,21	
	0,2				257793,58	456441,37	22,59	65,21	58,78	56,48	
2,00	0,05				297653,58	417313,56	24,7	71,33	64,3	61,77	109,33
	0,1	9811,85	20442,95	103094,9	268318,3	501331,02	20,56	59,37	53,52	51,42	
	0,2				257793,58	490806,3	21,01	60,65	54,67	52,52	

Таблица В.9 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{НОМ} = 1,5$ кВт при $p_E = 2,5$ руб/кВт· $k_d = 15\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{НОМ}}$
0,01	0,05				297653,58	531179,53	9,61	56,04	64,53	48,53	
	0,1	3303,32	13934,42	51042,03	268318,3	501844,25	10,17	59,31	50,51	51,37	36,81
	0,2				257793,58	491319,54	10,39	60,58	53,47	52,47	
0,05	0,05				297653,58	322912,3	17,22	92,18	54,61	79,83	38,27
	0,1	3434,15	14065,25	53063,49	268318,3	503865,72	11,03	59,07	83,09	51,16	
	0,2				257793,58	493341	11,27	60,33	53,25	52,25	
0,10	0,05				297653,58	535727,83	10,38	55,56	54,39	48,12	
	0,1	3597,68	14228,78	55590,33	268318,3	506392,55	10,98	58,78	50,08	50,91	40,09
	0,2				257793,58	495867,84	11,21	60,03	52,99	51,99	
0,50	0,05				297653,58	417313,58	18,16	71,33	54,11	61,77	
	0,1	4905,93	15537,03	75804,99	268318,3	526607,22	14,39	56,52	64,3	48,95	54,67
	0,2				257793,58	516082,5	14,69	57,68	50,95	49,95	
1,00	0,05				297653,58	322912,35	46,95	92,18	51,99	79,83	
	0,1	6541,24	17172,34	101073,3	268318,3	551875,55	27,47	53,93	83,09	46,71	72,89
	0,2				257793,58	541350,83	28,01	54,98	48,62	47,62	
2,00	0,05				297653,58	417313,66	36,33	71,33	49,56	61,77	
	0,1	9811,85	20442,95	151609,9	268318,3	602412,21	25,17	49,41	64,3	42,79	109,33
	0,2				257793,58	591887,49	25,61	50,29	44,54	43,55	

Таблица В.10 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 90$ кВт при $p_E = 1,2$ руб/кВт·, $k_d = 5\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТЮиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				8969999,37	19869970,1	5,37	45,14	44,09	39,73	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	1066174,9	8760147,14	19660117,8	5,42	45,63	44,56	40,15	
	0,2				7893946,68	18793917,4	5,67	47,73	46,61	42	
0,05	0,05				8969999,37	19912194,8	5,57	45,05	43,99	39,64	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	1108399,7	8760147,14	19702342,6	5,63	45,53	44,46	40,07	
	0,2				7893946,68	18836142,1	5,88	47,62	46,51	41,91	
0,10	0,05				8969999,37	19964975,8	5,82	44,93	43,88	39,54	858,37
	0,1	77034,06	714900,06	1161180,6	8760147,14	19755123,5	5,88	45,41	44,34	39,96	
	0,2				7893946,68	18888923,1	6,15	47,49	46,38	41,79	
0,50	0,05				8969999,37	20387223,3	7,77	44	42,97	38,72	1170,51
	0,1	105046,4	742912,45	1583428,1	8760147,14	20177371	7,85	44,46	43,42	39,12	
	0,2				7893946,68	19311170,6	8,2	46,45	45,36	40,88	
1,00	0,05				8969999,37	20915032,7	10,09	42,89	41,88	37,74	1560,68
	0,1	140061,9	777927,93	2111237,5	8760147,14	20705180,4	10,2	43,32	42,31	38,13	
	0,2				7893946,68	19838980	10,64	45,21	44,16	39,79	
2,00	0,05				8969999,37	7893968,45	40,12	113,63	110,97	100	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	3166856,3	8760147,14	21760799,2	14,55	41,22	40,26	36,28	
	0,2				7893946,68	20894598,8	15,16	42,93	41,93	37,78	

Таблица В.1.1 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{ном}} = 90$ кВт при $p_E = 1,7$ руб/кВт·год, $k_d = 5\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{ном}}}$
0,01	0,05				8969999,37	24320433,3	6,21	36,88	36,02	32,46	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	1510414,54	8760147,14	24110581,1	6,26	37,2	36,33	32,74	
	0,2				7893946,68	23244380,7	6,5	38,59	37,69	33,96	
0,05	0,05				8969999,37	24380251,7	6,44	36,79	35,93	32,38	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	1570232,94	8760147,14	24170399,5	6,5	37,11	36,24	32,66	
	0,2				7893946,68	23304199,1	6,74	38,49	37,59	33,87	
0,10	0,05				8969999,37	24455024,7	6,73	36,68	35,82	32,28	858,37
	0,1	77034,06	714900,06	1645005,94	8760147,14	24245172,5	6,78	37	36,13	32,56	
	0,2				7893946,68	23378972,1	7,04	38,37	37,47	33,77	
0,50	0,05				8969999,37	25053208,7	8,95	35,8	34,97	31,51	1170,51
	0,1	105046,45	742912,45	2243189,91	8760147,14	24843356,5	9,03	36,11	35,26	31,77	
	0,2				7893946,68	23977156	9,36	37,41	36,54	32,92	
1,00	0,05				8969999,37	25800938,7	11,59	34,77	33,95	30,6	1560,68
	0,1	140061,93	777927,93	2990919,89	8760147,14	25591086,5	11,69	35,05	34,23	30,85	
	0,2				7893946,68	24724886	12,1	36,28	35,43	31,93	
2,00	0,05				8969999,37	5770831,58	77,74	155,44	151,8	136,79	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	4486379,83	8760147,14	27086546,4	16,56	33,12	32,34	29,14	
	0,2				7893946,68	26220345,9	17,11	34,21	33,41	30,11	

Таблица В.12 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 90$ кВт при $p_E = 2,5$ руб/кВт·год, $k_d = 5\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТЮиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$							
												100	25,23	26	25,04	25,2	25,92	24,95
0,01	0,05			2221197,8	8969999,37	7893977,92	28,14	113,63	110,97	100	788,14							
	0,1	70731,28	708597,28		8760147,14	31281822,3	7,1	28,67	28	25,23								
	0,2				7893946,68	30365121,9	7,31	29,54	28,85	26								
0,05	0,05			2309166,1	8969999,37	31529142,8	7,32	28,45	27,78	25,04								
	0,1	73532,52	711398,52		8760147,14	31319290,6	7,37	28,64	27,97	25,2	819,36							
	0,2				7893946,68	30453090,1	7,58	29,46	28,77	25,92								
0,10	0,05			2419126,3	8969999,37	31639103,1	7,65	28,35	27,69	24,95								
	0,1	77034,06	714900,06		8760147,14	31429250,9	7,7	28,54	27,87	25,12	858,37							
	0,2				7893946,68	30563050,4	7,92	29,35	28,66	25,83								
0,50	0,05			3298808,7	8969999,37	32518785,4	10,14	27,58	26,94	24,28								
	0,1	105046,4	742912,45		8760147,14	32308933,2	10,21	27,76	27,11	24,43	1170,51							
	0,2				7893946,68	31442732,7	10,49	28,53	27,86	25,11								
1,00	0,05			4398411,6	8969999,37	33618388,3	13,08	26,68	26,06	23,48								
	0,1	140061,9	777927,93		8760147,14	33408536,1	13,17	26,85	26,22	23,63	1560,68							
	0,2				7893946,68	32542335,6	13,52	27,56	26,92	24,26								
2,00	0,05			6597617,4	8969999,37	5770840,1	114,33	155,44	151,8	136,79								
	0,1	210092,9	847958,9		8760147,14	35607741,9	18,53	25,19	24,6	22,17	2341,02							
	0,2				7893946,68	34741541,4	18,99	25,82	25,22	22,72								

Таблица В.13 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{ном}} = 90$ кВт при $p_E = 1, 2$ руб/кВт·кВт· $k_d = 10\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТЮиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{ном}}}$
0,01	0,05				6550179,12	7893960,96	9,69	82,98	81,04	73,10	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	764530,19	6396938,35	14274983,2	5,36	45,89	44,81	40,43	
	0,2				5770804,49	13648849,4	5,6	47,99	46,87	42,28	
0,05	0,05				6550179,12	14458502,4	5,5	45,3	44,24	39,91	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	794808,61	6396938,35	14305261,6	5,56	45,79	44,72	40,34	
	0,2				5770804,49	13679127,8	5,81	47,88	46,76	42,19	
0,10	0,05				6550179,12	14496350,44	6,66	36,97	36,11	32,57	858,37
	0,1	77034,06	714900,06	1179596,9	6396938,35	14343109,67	6,72	37,3	36,42	32,86	
	0,2				5770804,49	13716975,81	6,96	38,67	37,77	34,07	
0,50	0,05				6550179,12	14799134,68	8,86	36,1	35,25	31,8	1170,51
	0,1	105046,45	742912,45	1608541,23	6396938,35	14645893,90	8,94	36,41	35,55	32,07	
	0,2				5770804,49	14019760,04	9,26	37,72	36,84	33,23	
1,00	0,05				6550179,12	15177614,97	11,48	35,06	34,24	30,89	1560,68
	0,1	140061,93	777927,93	2144721,6	6396938,35	15024374,19	11,58	35,35	34,53	31,15	
	0,2				5770804,49	14398240,33	11,98	36,59	35,73	32,24	
2,00	0,05				6550179,12	5770810,27	72,87	148,37	144,9	130,71	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	3217082,4	6396938,35	15781334,77	16,41	33,42	32,64	29,44	
	0,2				5770804,49	15155200,9	16,96	34,52	33,71	30,41	

Таблица В.14 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 90$ кВт при $p_E = 1,7$ руб/кВт·, $k_d = 10\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТЮиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				6550179,12	7893964,15	13,72	82,98	81,04	73,10	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	1083084,4	6396938,35	17466310,7	6,2	37,5	36,62	33,04	
	0,2				5770804,49	16840176,9	6,43	38,9	37,99	34,27	
0,05	0,05				6550179,12	17662445,9	6,37	37,09	36,22	32,67	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	1125978,8	6396938,35	17509205,2	6,43	37,41	36,53	32,96	
	0,2				5770804,49	16883071,3	6,67	38,8	37,89	34,18	
0,10	0,05				6550179,12	17716064	6,66	36,97	36,11	32,57	858,37
	0,1	77034,06	714900,06	1179596,9	6396938,35	17562823,2	6,72	37,3	36,42	32,86	
	0,2				5770804,49	16936689,3	6,96	38,67	37,77	34,07	
0,50	0,05				6550179,12	18145008,3	8,86	36,1	35,25	31,8	1170,51
	0,1	105046,5	742912,45	1608541,2	6396938,35	17991767,5	8,94	36,41	35,55	32,07	
	0,2				5770804,49	17365633,7	9,26	37,72	36,84	33,23	
1,00	0,05				6550179,12	18681188,7	11,48	35,06	34,24	30,89	1560,68
	0,1	140061,9	777927,93	2144721,6	6396938,35	18527947,9	11,58	35,35	34,53	31,15	
	0,2				5770804,49	17901814,1	11,98	36,59	35,73	32,24	
2,00	0,05				6550179,12	4414815,15	72,87	148,37	144,9	130,71	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	3217082,4	6396938,35	19600308,8	16,41	33,42	32,64	29,44	
	0,2				5770804,49	18974174,9	16,96	34,52	33,71	30,41	

Таблица В.15 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{ном}} = 90$ кВт при $p_E = 2,5$ руб/кВт; $k_d = 10\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{ном}}}$
0,01	0,05				6550179,12	5770827,06	27,6	113,51	110,85	100,00	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	1592771,22	6396938,35	22572434,7	7,06	29,02	28,34	25,57	
	0,2				5770804,49	21946300,9	7,26	29,85	29,15	26,3	
0,05	0,05				6550179,12	22788755,6	7,27	28,74	28,07	25,32	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	1655851,27	6396938,35	22635514,8	7,32	28,94	28,26	25,49	
	0,2				5770804,49	22009380,9	7,52	29,76	29,06	26,22	
0,10	0,05				6550179,12	22867605,6	7,59	28,64	27,97	25,24	858,37
	0,1	77034,06	714900,1	1734701,33	6396938,35	22714364,8	7,64	28,84	28,16	25,41	
	0,2				5770804,49	22088231	7,85	29,65	28,96	26,13	
0,50	0,05				6550179,12	23498406,1	10,07	27,87	27,22	24,56	1170,51
	0,1	105046,45	742912,45	2365501,81	6396938,35	23345165,3	10,13	28,06	27,4	24,72	
	0,2				5770804,49	22719031,5	10,41	28,83	28,16	25,4	
1,00	0,05				6550179,12	24286906,7	12,99	26,97	26,34	23,76	1560,68
	0,1	140061,93	777927,9	3154002,42	6396938,35	24133665,9	13,07	27,14	26,51	23,91	
	0,2				5770804,49	23507532,1	13,42	27,86	27,21	24,55	
2,00	0,05				6550179,12	4414821,26	107,16	148,37	144,9	130,71	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	4731003,63	6396938,35	25710667,1	18,4	25,48	24,88	22,45	
	0,2				5770804,49	25084533,3	18,86	26,11	25,5	23,01	

Таблица В.16 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{НОМ} = 90$ кВт при $p_E = 1,2$ руб/кВт·год, $k_d = 15\%$

Приrost потерь	Сдвиг ТОиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{НОМ}}$
0,01	0,05				5004687,78	5770815,37	9,99	86,72	84,70	76,50	788,14
	0,1	70731,28	708597,2	576617,77	4887603,62	10883111,7	5,30	45,99	44,91	40,57	
	0,2				4414795,55	10410303,7	5,54	48,07	46,95	42,41	
0,05	0,05				5004687,78	11023032,3	5,7	45,4	44,34	40,05	819,36
	0,1	73532,52	711398,5	599454,12	4887603,62	10905948,1	5,76	45,89	44,82	40,48	
	0,2				4414795,55	10433140	6,02	47,97	46,85	42,32	
0,10	0,05				5004687,78	11051577,7	5,68	45,28	44,23	39,95	858,37
	0,1	77034,06	714900,1	627999,55	4887603,62	10934493,5	5,74	45,77	44,7	40,37	
	0,2				4414795,55	10461685,5	6	47,84	46,72	42,2	
0,50	0,05				5004687,78	11279941,2	7,59	44,37	43,33	39,14	1170,51
	0,1	105046,4	742912,4	856363,02	4887603,62	11162857	7,67	44,83	43,78	39,55	
	0,2				4414795,55	10690048,9	8,01	46,82	45,72	41,3	
1,00	0,05				5004687,78	11565395,5	14,81	43,27	42,26	38,17	1560,68
	0,1	140061,9	777927,9	1141817,4	4887603,62	11448311,3	14,96	43,72	42,69	38,56	
	0,2				4414795,55	10975503,3	15,6	45,6	44,53	40,22	
2,00	0,05				5004687,78	4414807,57	38,8	113,36	110,71	100	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	1712726,1	4887603,62	12019220	14,25	41,64	40,66	36,73	
	0,2				4414795,55	11546412	14,83	43,34	42,33	38,24	

Таблица В.17 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{ном}} = 90$ кВт при $p_E = 1,7$ руб/кВт·год, $k_d = 15\%$

Прирост потерь	Сдвиг ТЮиР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	LCC , тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{ном}}}$
0,01	0,05				5004687,78	5770817,78	14,16	86,72	84,7	76,5	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	816875,17	4887603,62	13290048,9	6,15	37,66	36,78	33,22	
	0,2				4414795,55	12817240,9	6,37	39,05	38,13	34,44	
0,05	0,05				5004687,78	13439484,6	6,62	37,24	36,37	32,85	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	849 226,66	4887603,62	13322400,4	6,68	37,57	36,69	33,14	
	0,2				4414795,55	12849592,4	6,92	38,95	38,04	34,36	
0,10	0,05				5004687,78	13479924	6,6	37,13	36,26	32,75	858,37
	0,1	77034,06	714900,06	889666,03	4887603,62	13362839,8	6,66	37,45	36,58	33,04	
	0,2				4414795,55	12890031,7	6,9	38,83	37,92	34,25	
0,50	0,05				5004687,78	13803438,9	8,79	36,26	35,41	31,98	1170,51
	0,1	105046,45	742912,45	1213180,9	4887603,62	13686354,7	8,86	36,57	35,71	32,26	
	0,2				4414795,55	13213546,7	9,18	37,88	36,99	33,41	
1,00	0,05				5004687,78	14207832,5	17,08	35,22	34,4	31,07	1560,68
	0,1	140061,93	777927,93	1213180,9	4887603,62	14090748,4	17,22	35,52	34,69	31,33	
	0,2				4414795,55	13617940,3	17,82	36,75	35,89	32,42	
2,00	0,05				5004687,78	8760161,57	27,7	57,13	55,79	50,4	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	2426361,9	4887603,62	7893961,11	30,74	63,4	61,92	55,93	
	0,2				4414795,55	14426727,6	16,82	34,69	33,88	30,6	

Таблица В.18 – Полный расчет стоимости этапа эксплуатации жизненного цикла с учетом всех рассматриваемых в модели сценариев для двигателя $P_{\text{НОМ}} = 90$ кВт при $p_E = 2,5$ руб/кВт·г, $k_d = 15\%$

Приrost потерь	Сдвиг ТОНР	E_L , кВт/год	E , кВт/год	C_{PEL} , руб.	C_{MRO} , тыс. руб.	$ LCC $, тыс. руб.	$\frac{C_{PEL}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO5\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO10\%}}{ LCC }$	$\frac{C_{MRO20\%}}{ LCC }$	$\frac{P_L}{P_{\text{НОМ}}}$
0,01	0,05				5004687,78	4414812,69	27,21	113,36	110,71	100,00	788,14
	0,1	70731,28	708597,28	1201287,02	4887603,62	17141148,5	7,01	29,2	28,51	25,76	
	0,2				4414795,55	16668340,4	7,21	30,03	29,32	26,49	
0,05	0,05				5004687,78	17305808,3	7,56	28,92	28,24	25,51	819,36
	0,1	73532,52	711398,52	1248862,74	4887603,62	17188724,2	7,61	29,12	28,43	25,68	
	0,2				4414795,55	16715916,1	7,83	29,94	29,24	26,41	
0,10	0,05				5004687,78	17365278	7,53	28,82	28,15	25,42	858,37
	0,1	77034,06	714900,06	1308332,39	4887603,62	17248193,8	7,59	29,02	28,34	25,6	
	0,2				4414795,55	16775385,8	7,8	29,83	29,14	26,32	
0,50	0,05				5004687,78	17841035,2	10	28,05	27,4	24,75	1170,51
	0,1	105046,45	742912,45	1784089,63	4887603,62	17723951,1	10,07	28,24	27,58	24,91	
	0,2				4414795,55	17251143	10,34	29,01	28,33	25,59	
1,00	0,05				5004687,78	18435731,8	19,35	27,15	26,51	23,95	1560,68
	0,1	140061,93	777927,93	2378786,17	4887603,62	18318647,6	19,48	27,32	26,68	24,1	
	0,2				4414795,55	17845839,5	19,99	28,04	27,39	24,74	
2,00	0,05				5004687,78	8760166,18	40,73	57,13	55,79	50,4	2341,02
	0,1	210092,9	847958,9	3568179,26	4887603,62	7893965,72	45,2	63,4	61,92	55,93	
	0,2				4414795,55	19035232,6	18,75	26,29	25,68	23,19	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения результатов диссертации



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«КОМПЛЕКСНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

198206, г. Санкт-Петербург, Петергофское шоссе, д. 73У ИНН 5321205660
ТЕЛЕФОН: +7 (812) 209-90-91 E-MAIL: info@kit-electro.ru www.kit-electro.ru
КПП: 532101001 ОГРН: 1215300000893 ОКПО: 49205784



АКТ

**внедрения результатов научных исследований
в рамках подготовки кандидатской диссертации
Булдыско Александры Дмитриевны**

но научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель – Технический директор Овчинников Александр Витальевич

Члены комиссии: Директор по развитию Иванов Илья Валерьевич

Директор по маркетингу Зимовец Алексей Иванович

Руководитель направления сервиса Кулик Андрей Александрович

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение эффективности эксплуатации асинхронного электропривода на основе ранней идентификации дефектов путем анализа сингулярного спектра тока», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, представляют практический интерес для ООО «НПП «Комплексные интеллектуальные технологии» и внедрены в производственную деятельность ООО «НПП «КИТ» при разработке микропроцессорных устройств релейной защиты в электротехнических комплексах, имеющих в своем составе электропривод, построенный на основе асинхронного двигателя, в виде:

«Алгоритма выявления дефекта подшипника асинхронного двигателя на основе анализа сингулярного спектра тока статора».

Использование предложенного алгоритма позволит идентифицировать дефект подшипника асинхронного двигателя на ранней стадии, что обеспечит эффективное планирование мероприятий технического обслуживания, а также снизит затраты на внеплановые простои оборудования.

Председатель комиссии

Технический директор Овчинников Александр Витальевич

Члены комиссии:

Директор по развитию Иванов Илья Валерьевич

Директор по маркетингу Зимовец Алексей Иванович

Руководитель направления сервиса Кулик Андрей Александрович

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023660650

ПРОГРАММА РАСПОЗНАВАНИЯ НАЛИЧИЯ
ДЕФЕКТА ПОДШИПНИКА АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ

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

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Булдыско
Александра Дмитриевна (RU)*

Заявка № 2023617330

Дата поступления 19 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022616081

**Программа для измерения напряжения износа
подшипника асинхронного двигателя по компонентам
векторов Парка тока и напряжения**

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

Авторы: *Котелева Наталья Ивановна (RU), Королёв
Николай Александрович (RU), Булдыско Александра
Дмитриевна (RU)*

Заявка № 2022614347

Дата поступления 24 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 апреля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов