Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

На правах рукописи

ТАРАНОВ Сергей Игоревич

СТРУКТУРА И СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНО–ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Санкт–Петербург–2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение……... 4
1 Формирование горно–транспортных комплексов для обеспечения эффективной добычи транспортировки твердых ископаемых на открытых разработках…… 11
1.1 Необходимость создания единого подхода для формирова комплексов для добычи и транспортировки горной массы …….. 13
1.2 Снижение затрат на проектирование и обслуживание электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса путем унификации его структуры…… 20
1.3 Оптимальная структура систем диагностики и определения остаточного ресурса электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса …….. 24
1.4 Выводы по главе 1……... 32
2 Унифицированный подход в формировании структуры систем управления электроприводов переменного тока горно–транспортного комплекса …… 33
2.1 Специфика и особенности применения электропривода переменного тока на современных большегрузных самосвалах и экскаваторах……. 34
2.2 Унифицированный подход к построению алгоритмов управления электроприводом переменного тока горно–транспортного комплекса ……. 44
2.3 Построение математической модели электропривода экскаватора и самосвала с применением системы прямого управления моментом..... 59
2.4 Выводы по главе 2……..……..……... 71
3 Повышение эксплуатационной эффективности электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса за счет перехода на систему обслуживания по фактическому состоянию…… 72
3.1 Системы мониторинга, диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса ……. 75
3.2 Виды повреждений электрических машин и существующие методы их диагностики ……. 82
3.3 Применение методов ваттметрографии и спектрального

анализа для оценки технического состояния электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса …….. 92

3.4 Алгоритм непрерывного отслеживания повреждений и оценки остаточного ресурса с использованием базы данных повреждений … 108

3.5 Пример реализации модели нечеткой классификации дефектов для диагностической системы электромеханического оборудования в программе MatLab……... 119

3.6 Выводы по главе 3…….…..... 124

4 Примеры реализации системы диагностики по спектральному составу тока и напряжения……..... 128

4.1 Построение системы технической диагностики электромеханического оборудования по электрическим параметрам…….. 129

4.2 Аппаратная реализация системы диагностики с применением методов спектрального анализа и ваттметрографии…… 131

4.3 Программная реализация системы диагностики электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса…….. 139

4.4 Выводы по главе 4…….…..... 147

5 Технико–экономическое обоснование применения унифицированного подхода в проектировании, обслуживании и формировании горно–транспортных комплексов……... 148

5.1 Критерии оценки эффективности работы горно–транспортных комплексов ……..…… 149

5.2 Обоснование необходимости связи самосвалов и экскаваторов в горно–транспортный комплекс на примере экскаватора ЭКГ–32р и самосвалов БелАЗ…… 152

5.3 Оценка экономической эффективности внедрения системы диагностики и мониторинга электромеханического оборудования горно–транспортных комплексов……... 160

5.4 Оценка экономической эффективности предложенных мероприятий……. 162

5.5 Выводы по главе 5…….…..... 171

Заключение……..……. 172

Список литературы …….…... 174

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Наиболее распространенным видом добычи полезных ископаемых на горнодобывающих предприятиях России является добыча открытым способом, а основными средствами реализации погрузочно–доставочных работ – большегрузные карьерные самосвалы и экскаваторы. Рынок большегрузной техники сегодня имеет различные решения по формированию горно–транспортных комплексов (экскаватор и самосвал), но наиболее эффективными остаются экскаваторы с электроприводами (ЭП) различного типа и самосвалы, имеющие электромеханическую трансмиссию. Электромеханическое оборудование приводов главных механизмов отличается по составу и типу применяемых преобразователей, что влечет за собой увеличение эксплуатационных затрат. Самыми распространенными системами ЭП экскаваторов сегодня остаются система генератор–двигатель (Г–Д) и система «управляемый выпрямитель–двигатель» (ТП–Д). Проблема их применения–электродвигатели постоянного тока, имеющие щеточно–коллекторный узел и повышенные массо–габаритные показатели. Имеются примеры создания и применения в отечественной практике систем «непосредственный преобразователь частоты–асинхронный двигатель» (НПЧ–АД), в частности в 1990 г был введен в эксплуатацию ЭШ 20.90 на разрезе "Сафроновский" ОАО "Востсибуголь", находящийся в эксплуатации по настоящее время. Система НПЧ–АД не получила широкого распространения из–за наличия ряда существенных недостатков. На сегодняшний день перспективной является система «преобразователь частоты–асинхронный двигатель» со звеном постоянного тока. Примерно та же ситуация обстоит с использованием ЭП мотор–колес самосвалов. Применение электродвигателя постоянного тока, позволившего повысить грузоподъемности самосвалов от 90 до 200 т в 70-е годы, нецелесообразно для дальнейшего развития карьерного автотранспорта из-за снижения

надежности коллектора при больших рабочих токах и частотах вращения и увеличения цены двигателей непропорционально росту мощности и массо–габаритных размеров. Повышение эффективности использования машин горно–транспортного комплекса (ГТК) за счет применения современного бесконтактного ЭП переменного тока на основе асинхронных двигателей и преобразователей частоты с активным выпрямителем при максимальной степени унификации структуры систем управления, с использованием энергоэффективных алгоритмов управления и формирования единых подходов к его обслуживанию и оценке остаточного ресурса является актуальной научно–технической задачей.

Степень разработанности

Работа базируется на результатах исследований Кулешова А.А., Серова Н.А., Рудакова В.В., Мариева П.Л., Егорова А.Н., Зырянова И.В., Вейнреба К.Б., Bellini A., Ключева В.И., Микитченко А.Я. и др.

В работах Рудакова В.В., Мариева П.Л., Зырянова И.В. рассматриваются проблемы повышения эксплуатационной эффективности горно–транспортных комплексов за счет сокращения времени простоев и оптимизации обслуживания. Однако в работах не рассматриваются вопросы совместной диагностики и определения остаточного ресурса электромеханического оборудования (ЭМО) самосвалов и экскаваторов. В работах также не рассматриваются вопросы унифицированного подхода к проектированию электромеханического оборудования горно–транспортных комплексов.

В работах Вейнреба К.Б., Bellini A. рассматриваются вопросы диагностики технического состояния двигателей методами спектрального анализа питающего напряжения и тока. Однако в работах не рассматривается создание единой базы данных повреждений.

В настоящее время остаются нерешенными ряд вопросов, связанных с унификацией состава электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса, вопросы применения асинхронного электропривода для главных механизмов экскаватора и самосвала и вопросы единого подхода к диагностике и перехода на систему обслуживания по фактическому состоянию электромеханического оборудования.

Цель работы – повышение эффективности использования электромеханического оборудования горно–транспортных комплексов путем применения унифицированной структуры электропривода переменного тока главных механизмов экскаваторов и самосвалов с применением энергоэффективных алгоритмов управления и перехода на систему обслуживания электромеханического оборудования по фактическому состоянию.

Идея работы – выбор унифицированной структуры электроприводов машин горно–транспортных комплексов и эффективных алгоритмов управления и диагностики электромеханического оборудования.

Основные задачи исследования:

для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выполнить сопоставительный анализ существующих горно–транспортных комплексов и организации их работы на предприятиях России;

– обосновать целесообразность сопоставления грузоподъемности самосвала и объема ковша экскаватора по принципу обеспечения оптимального числа циклов экскавации;

– выполнить математическое моделирование ЭП переменного тока самосвала и экскаватора с целью сопоставления их рабочих характеристик и разработки предложений по возможной унификации структуры электромеханического оборудования горно–транспортных комплексов;

– провести анализ существующих алгоритмов управления ЭП переменного тока и оценку показателей их быстродействия;

– исследовать энергетические и регулировочные характеристики частотно–регулируемого ЭП на модели при различных технологических режимах работы с использованием релейно–импульсных алгоритмов управления;

– выполнить анализ существующих методов диагностики и оценки состояния электромеханического оборудования горно–транспортных комплексов;

– разработать рекомендации по подходу к диагностированию технического состояния и определению остаточного ресурса электродвигателей самосвалов и экскаваторов по параметрам потребляемого тока и напряжения питания двигателя;

Методы исследований

Для выполнения поставленных задач использовались методы теории электропривода, методы теории автоматического управления сложной электромеханической системой.

Математическое имитационное моделирование, расчеты и анализ полученных результатов проводились с использованием пакета *Simulink* прикладных программ *MatLab*.

Применение методов ваттметрографии и спектрального анализа при разработке систем мониторинга и диагностики электромеханического оборудования.

Научная новизна работы

– обоснована эффективность построения горно–транспортных комплексов по принципу обеспечения наименьшего числа циклов экскавации;

– при математическом моделировании получены диаграммы режимов работы электропривода переменного тока, подтверждающие возможность унификации структуры электропривода горно–транспортных комплексов;

– обоснована целесообразность применения системы диагностики электродвигателей с использованием методов спектрального анализа и ваттметрографии.

– предложен переход на систему обслуживания электромеханического оборудования горно–транспортных комплексов по фактическому состоянию с использованием методов ваттметрографии и спектрального анализа напряжения питания двигателя.

– обоснована эффективность применения релейно–импульсных алгоритмов управления для главных ЭП карьерных экскаваторов и мотор–колес самосвалов.

Практическая ценность диссертации:

– предложен и обоснован рациональный подход к формированию ГТК с обеспечением оптимального числа циклов экскавации на основе грузоподъемности самосвала и объема ковша экскаватора;

– обосновано применение единой структуры ЭП переменного тока главных приводов экскаватора и самосвала с применением векторных и релейно-импульсных алгоритмов управления моментом асинхронного электродвигателя на основе математической модели;

– предложен и обоснован рациональный подход к построению системы обслуживания ЭМО ГТК по фактическому состоянию с применением методов спектрального анализа и ваттметрографии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Электромеханическое оборудование ГТК следует создавать на базе высокоэффективных бесконтактных асинхронных электроприводов с обеспечением высокой степени унификации структуры ЭП с реализацией алгоритмов максимального быстродействия в контуре тока (момента).

2. Эксплуатационная эффективность электромеханического оборудования ГТК повышается за счет перехода к обслуживанию по фактическому состоянию путем создания систем мониторинга, непрерывной диагностики и оценки остаточного ресурса.

Практическая ценность диссертации:

– предложен и обоснован рациональный подход к формированию ГТК с обеспечением оптимального числа циклов экскавации на основе грузоподъемности самосвала и объема ковша экскаватора;

– обосновано применение единой структуры ЭП переменного тока главных приводов экскаватора и самосвала с применением векторных и релейно-импульсных алгоритмов управления моментом асинхронного электродвигателя на основе математической модели;

– предложен и обоснован рациональный подход к построению системы обслуживания ЭМО ГТК по фактическому состоянию с применением методов спектрального анализа и ваттметрографии.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждается сходимостью результатов математического моделирования, экспериментальных исследований частотно-регулируемого ЭП с релейно-импульсными табличными алгоритмами управления не менее 95%.

Реализация результатов работы

Разработанные принципы, методы, механизмы и научно-практические рекомендации могут быть использованы:

– на предприятиях, занимающихся проектированием ЭП переменного тока для самосвалов и экскаваторов, в частности на ОАО «ИЗ - Картекс им. П.Г. Коробкова» и ОАО «Силовые машины»;

– на горнодобывающих предприятиях МСК и ТЭК России, использующих большегрузный карьерный транспорт для выемки горной массы.

Результаты работы имеют практическое значение для модернизации системы обслуживания и построения рабочего процесса ГТК предприятий, занимающихся добычей полезных ископаемых открытым способом.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих конференциях: Международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» в 2012 году в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу в 2012 году в Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 7 печатных работах, в том числе 1 работа в зарубежном издании, 3 работы в научных изданиях, включенных в «Перечень ВАК РФ», 3 работы в других изданиях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 186 страницах, содержит 49 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 120 наименований.

1 ФОРМИРОВАНИЕ ГОРНО–ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОБЫЧИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТВЕРДЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ

Минерально-сырьевой комплекс (МСК) продолжает играть ключевую роль в социально-экономическом развитии России. Основной проблемой практического плана является экономически низкоэффективное функционирование добывающих и перерабатывающих сырье производств.

Нерациональное использование природно-ресурсной базы, ухудшение горно–геологических условий месторождений, значительная степень износа основных производственных фондов, отсутствие современных технологий добычи сырья, высокая степень опасности производства приводят к тому, что непрерывно растут издержки производства. Высокая себестоимость добычи минерального сырья и выпуска готовой продукции при среднем качестве, увеличение нагрузки на существующие производственные мощности, при значительной степени износа добычного оборудования, существенно понижают конкурентоспособность предприятий минерально-сырьевого и топливно–энергетического комплексов (ТЭК) нашей страны.

Для повышения конкурентоспособности предприятий МСК и ТЭК в сложившихся условиях важнейшими задачами являются снижение себестоимости добываемого сырья за счет повышения эффективности использования основных производственных фондов, повышения энергоэффективности производства при росте объемов выпускаемой продукции.

Между тем, с каждым годом растут объемы выемки горной массы в различных регионах нашей страны по разным видам полезных ископаемых. По данным, приведенным в [58], рост добычи сохранится и к 2020 году вырастет в 1,5–2 раза. Соответственно, пропорционально росту добычи будет

увеличиваться потребность в новой карьерной технике, причем в технике, обладающей большими объемами перевозки и добычи (таблица 1.1) [58].

Таблица 1.1 – Объемы добычи полезных ископаемых, экскавируемой горной массы и перевозок автотранспортом на открытых работах до 2020 года.

Подотрасли	2000 г.	2005 г.	2010г.	2020г.
Угольная промышленность				
Добыча, млн. т:				
–угля	153	185	218	245
–горной массы	614	740	873	980
Объем перевозок автотранспортом:				
–млн.т	399	481	567	636
–млн. т/км	1596	1924	2270	2546
Железорудная промышленность:				
Добыча, млн.т:				
руды	200	200	300	400
горной массы	770	770	800	1000
Объем перевозок автотранспортом:				
млн. т	478	478	570	670
млн. т/км	1337	1672	2102	2962
Цветная металлургия:				
Добыча, млн.т:				
руды	200	220	250	290
горной массы	740	800	850	900
Объем перевозок автотранспортом:				
млн. т.	518	559	540	620
млн. т/км	1540	1813	1813	3277

В свете изложенных моментов, характеризующих тенденции развития открытых горных работ на современном этапе и в перспективе, целесообразно будет рассматривать погрузочно–транспортные комплексы на базе канатных экскаваторов–мехлопат и большегрузных автосамосвалов. Поскольку автотранспортная часть комплекса является более динамичной и гибкой с точки зрения эксплуатации, обладающей большим разнообразием по типажу и меньшим сроком службы, при том, что стоимость самосвалов, в большинстве своем, ниже стоимости канатного экскаватора–мехлопаты, необходимо рассматривать создание комплекса относительно экскаватора.

1.1 НЕОБХОДИМОСТЬ СОЗДАНИЯ ЕДИНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ГОРНОЙ МАССЫ

В первую очередь, при проектировании новых карьеров и при закупке основных производственных мощностей на уже существующие карьеры встает вопрос о типе используемого оборудования. В частности, это касается типа экскаватора. Состояние рынка карьерных экскаваторов с объемом ковша от 20 до 50 $м^3$ на сегодняшний день насчитывает десятки моделей как гидравлических, так и канатных (с использованием электроприводов) экскаваторов.

Первоочередная разница состоит в том, что последние получают питание от питающего кабеля и не имеют возможности работать автономно. В качестве машинного преобразователя в гидравлических экскаваторах также могут применяться электродвигатели, получающие питание от общей энергосистемы посредством сетевого кабеля, но это используется крайне редко, и при таком исполнении они теряют свое основное преимущество – автономность. А что касается области эффективного применения этих двух типов машин, корректнее рассматривать особенности конструкций, определяющих условия применения этих экскаваторов на карьерах. К примеру, канатные экскаваторы не могут быть использованы в обводненных забоях, а также в забоях, где невозможна или затруднена прокладка кабельной линии. И это одни из ключевых критериев, по которым предпочтение отдается в пользу гидравлических экскаваторов.

В России канатные карьерные экскаваторы составляют 90% всего парка выемочного оборудования при открытой добыче полезных ископаемых, при вскрышных работах и при земляных работах в гидростроительстве. Карьерные канатные экскаваторы выпускаются с рабочим оборудованием типа «прямая мехлопата» и применяются при

валовой выемке всех типов пород. Благодаря своей конструкции канатные экскаваторы обладают характерной траекторией копания с неравномерным распределением усилия копания по ней, что можно также отнести к недостаткам канатных экскаваторов. Однако именно канатный подъем и соответствующая траектория копания обеспечивают достижение времени цикла 28-32 С практически у всех типоразмеров канатных экскаваторов, что предопределяет их высокую производительность и долговечность.

Срок службы канатного экскаватора превышает 20 лет. Так, в настоящее время средний срок службы карьерной мехлопаты составляет: для ЭКГ-5, производства ОАО «Уралмашзавод» – 27 лет, для ЭКГ–20, производства ООО «ИЗ – КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова» — 20 лет. Расчетный срок службы канатных экскаваторов зарубежных производителей, к примеру, фирмы Бюсайрус составляет 125000 ч работы (по 7500 ч в год), то есть около 25 лет [49].

Основываясь на данных о работе экскаваторов на различных горных предприятиях, технической литературе и информации от самих фирм производителей, надежность металлоконструкций гидравлических экскаваторов рассчитана максимально на 40-60 тыс. ч. К тому же, их ремонт не может быть произведен собственными силами, в отличие от канатных экскаваторов, где многие дефекты могут быть устранены при помощи сварки и замены изношенных частей. Таким образом, срок службы канатных экскаваторов значительно (минимум в 3 раза) выше, чем у гидравлических экскаваторов. Для многих потребителей это является ключевым критерием при выборе канатных экскаваторов. Ко всему этому, стоимость мотор–часа работы гидравлических экскаваторов, стоимость обслуживания, необходимость содержания горюче – смазочного оборудования и складов, повышают себестоимость экскавации, которая в разы превышает себестоимость работы канатных экскаваторов с электроприводом. Тенденция

сокращения себестоимости за счет использования канатных экскаваторов сохранится и в последующие годы.

Как отмечается в [58], в последние 5 лет многое изменилось как на карьерах, так и в тенденциях развития машиностроения. Изменилась глубина карьеров и, соответственно, выросла протяженность карьерных дорог. Добывать полезные ископаемые существующими производственными мощностями становится все более невыгодно. В этой связи существенно изменяется модельный ряд и грузоподъемность самосвалов, меняется модельный ряд экскаваторов–мехлопат с различными объемами ковша. Белорусский завод перешел на создание супербольшегрузных самосвалов грузоподъемностью 320-360 тонн, создана экспериментальная модель самосвала грузоподъемностью 450 тонн. Потребность в автосамосвалах для добывающих предприятий России до 2020 года представлена на рисунке 1.1.

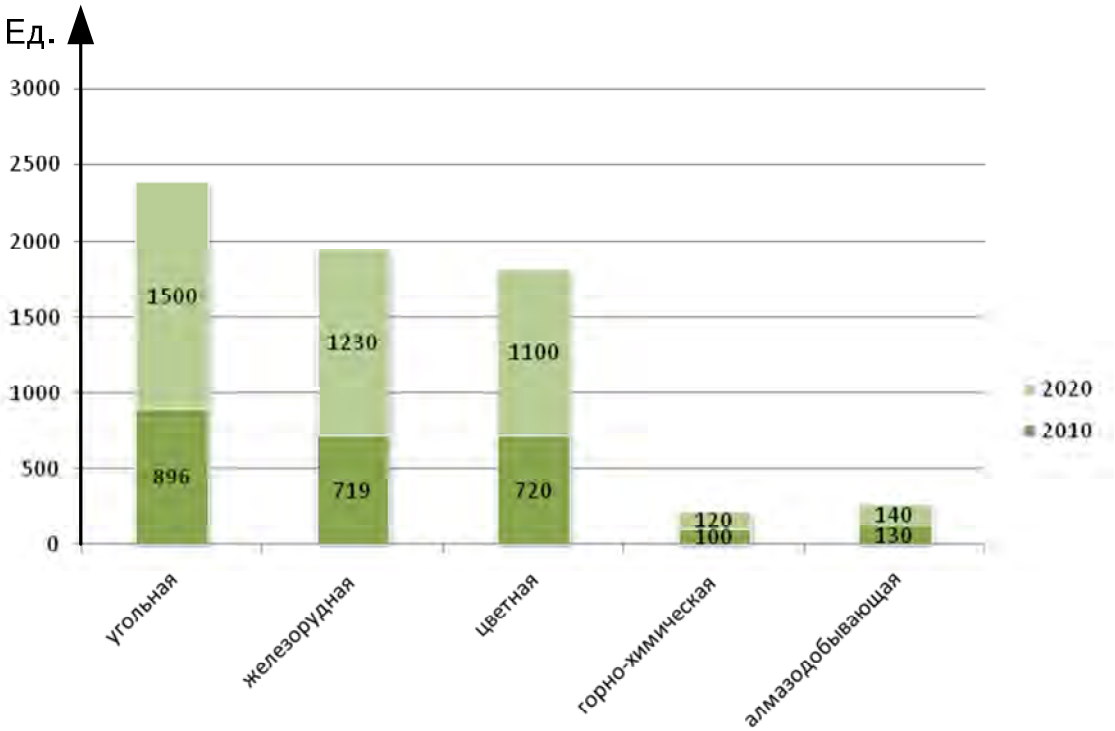

Рисунок 1.1 – Потребность в автосамосвалах для различных отраслей добывающей промышленности до 2020 года

В свою очередь, ООО «ИЗ – КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова» запустило в производство экскаваторы ЭКГ–32Р, ЭКГ–35К с объемном ковшей от 25 до 40 м^3 и массой породы в ковше до 63 тонн. В настоящий момент законченно проектирование экскаватора ЭКГ–50 с объемом ковша до 60 м^3 с массой породы в ковше до 110 тонн. Экскаватор планируется поставить заказчику к концу 2014 года.

Изменилась тенденция и в приводном электрооборудовании. За последние годы возросло применение электропривода переменного тока на основе асинхронных двигателей (АД) на экскаваторах и самосвалах. Это произошло не случайно, поскольку преимущество частотно-регулируемых приводов с применением АД очевидно. Применение электроприводов переменного тока обусловлено следующими показателями:

– высокая производительность. Экскаваторы с приводом переменного тока имеют более высокую скорость работы по сравнению с машинами, работающими на постоянном токе из-за отсутствия ограничений, накладываемых процессами коммутации, что обеспечивает экскаваторам с приводом переменного тока более высокий КПД [49];

– превосходный коэффициент технической готовности. Канатные экскаваторы с электрическим приводом с модулями IGBT обычно демонстрируют коэффициент готовности электрических узлов более 98% [49];

– более высокая надежность. Машины с приводами переменного тока менее уязвимы при колебаниях напряжения [49];

– большая эффективность. Электропривод переменного тока, по системе ПЧ–АД, обеспечивает 30% экономии электроэнергии по сравнению с аналогичными приводами [49];

– снижение затрат на обслуживание. Силовые преобразователи на IGBT–модулях не требуют регулярного технического обслуживания и полностью взаимозаменяемые, при этом асинхронные двигатели также менее

прихотливы в эксплуатации из–за отсутствия щеточно–коллекторного узла [49];

– плавное изменение частоты вращения вала двигателя;

– более высокая точность при управлении электроприводом.

В частности, на экскаваторах ЭКГ–32Р, ЭКГ–35К и ЭКГ–50 устанавливаются электроприводы переменного тока, построенные по системе ПЧ–АД. Данные по экскаваторам производства ООО «ИЗ – КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова» приведены в таблице 1.2 [67].

Таблица 1.2 – Технические характеристики перспективных моделей экскаваторов производства ООО «ИЗ – КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова»

Наименование параметра	**Ед. изм.**	**Модели экскаваторов**				
		ЭКГ-12М	**ЭКГ-20М**	**ЭКГ-32Р**	**ЭКГ-40**	**ЭКГ-50**
Номинальная полезная нагрузка	т	30	50	64	80	108
Вместимость основного ковша (для породы 2,0 т/м3)	$м^3$	15	25	32	40	55
Вместимость сменных ковшей	$м^3$	12-20	20-32	26-42	36-50	45-77
Наибольший радиус копания	м	20,6	21,7	24	24	24
Наибольшая высота копания	м	16	16,4	19	17	17
Тип электропривода		ПЧ-АД ТрП-Д ТП-Д	ПЧ-АД ТрП-Д ТП-Д	ПЧ-АД	ПЧ-АД	ПЧ-АД
Рабочая масса экскаватора	т	480	750	1050	1250	1550
Среднее давление на грунт	$кгс/см^2$	2,39	2,4	2,54	3,4	3,99

При производстве современных экскаваторов прослеживается тенденция применения активных выпрямителей (АВ) для преобразования энергии в обоих направлениях. Применение активного выпрямителя обусловлено следующими показателями:

– замена системы Г–Д электроприводом по системе ПЧ–АД приводит к сокращению количества машин, к повышению надежности, к снижению трудоемкости обслуживания;

– позволяет стабилизировать напряжение питания инверторов при изменении напряжения сети в широких пределах;

– активные выпрямители ограничивают пусковые токи номинальными значениями, обеспечивают электромагнитную совместимость электроприводов с электросетью.

Решение о применении частотного электропривода переменного тока с активным выпрямителем позволило достичь беспрецедентных показателей по удельному расходу электроэнергии. Средний удельный расход электроэнергии экскаватора ЭКГ-32Р находится в пределе 0,30-0,32 кВт·ч/м^3 (по данным ОАО «УК «Кузбассразрезуголь и ООО «ОМЗ-Сибирь-Сервис»), что лучше показателей конкурентов [67].

Обозначенная тенденция сохранится и в последующие годы, поскольку это является наиболее оптимальным подходом с точки зрения энергоэффективности эксплуатации электромеханического оборудования и комплекса в целом.

Повышение эффективности эксплуатации добычного комплекса за счет рационализации его структуры

Повышение энергоэффективности и снижение производственных издержек может быть достигнуто за счет рационализации структуры добычного комплекса, состоящего из самосвала и экскаватора–мехлопаты (горно–транспортный комплекс), по принципу обеспечения наименьшего числа циклов экскавации, уменьшения времени простоя экскаватора и самосвала.

В настоящее время на предприятиях России среднее число циклов экскавации может достигать 6–9 циклов для загрузки одного самосвала, что является крайне неэффективным и указывает на диспропорцию между вместимостью ковша экскаватора и грузоподъемностью самосвала. К примеру, если длительность одного цикла экскавации составляет в среднем 30-40 секунд, то время погрузки составит примерно 6 минут, с учетом времени затраченного на подход самосвала под ковш экскаватора. Если к этому прибавить время, затраченное на ожидание в очереди под погрузку, что в среднем составляет 5-10 минут, то в среднем за смену мы получим 45-75 минут простоя самосвала, что является убыточным и неприемлемым для любого типа открытых горных работ.

Обеспечение оптимального числа циклов экскавации позволит сократить и энергопотребление экскаватора (поскольку наибольший расход энергии происходит во время копания и непосредственной погрузки породы в кузов самосвала), а также снизит время, затраченное самосвалом на загрузку и, как следствие, позволит уменьшить число самосвалов, обслуживающих один экскаватор, либо позволит увеличить объем добычи, при той же технической базе. Исходя из мировой практики, оптимальным считается число циклов, равное от 3 до 5. Данный подход является наиболее оптимальным и экономичным при работе горно–транспортного комплекса (ГТК). Создание ГТК является основой для бесперебойной работы добывающего предприятия.

Кроме того, составляющими рентабельного функционирования добывающих предприятий является эффективная организация основных и обслуживающих производственных процессов, в частности, организация системы обслуживания существующих добычных машин и оборудования.

1.2 СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГТК ПУТЕМ УНИФИКАЦИИ ЕГО СТРУКТУРЫ

На сегодняшний день затраты на обслуживание и ремонт добывающих мощностей составляют одну из основных статей в структуре себестоимости добычи сырья, помимо того, в большинстве случаев на горнодобывающих предприятиях МСК и ТЭК наблюдается низкоэффективная система организации работы горно–транспортных комплексов, их нерациональное использование, что влечет за собой снижение срока службы оборудования. Все это приводит к возникновению значительных внеплановых простоев, которые связаны с существенными убытками предприятий.

Обеспечить снижение затрат на обслуживание и проектирование электромеханической части ГТК, на наш взгляд, позволит унифицированный подход к проектированию электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса, поскольку именно этой части экскаватора и самосвала требуется наибольшее количество высококвалифицированных кадров, способных настроить систему управления электроприводом, обслужить электромеханическое оборудование, отследить и предотвратить серьезные поломки, а в случае их возникновения, своевременно устранить.

Возможность унификации целесообразно рассматривать в структуре и алгоритмах управления главными приводами машин. Это поможет частично облегчить проблему подготовки кадров на предприятии, поскольку унификация оборудования влечет уменьшение номенклатуры обслуживаемого оборудования и единообразие в его настройке. Применение унифицированной системы управления электроприводом по принципу прямого управления моментом подходит как для самосвала, так и для основных приводов экскаватора. Следовательно, при схожих параметрах

электродвигателей мы можем сделать вывод о возможности применения одного типа инвертора и принципа формирования питающего напряжения. Поскольку состав электромеханического оборудования будет относительно одинаков (за исключением применения на экскаваторах активного выпрямителя, обеспечивающего рекуперацию энергии в питающую сеть, а также небольшой конструктивной разницы асинхронных двигателей), то и процесс обучения высококвалифицированного персонала будет меньше.

В последние годы выросло применение электроприводов переменного тока в горно–транспортном комплексе. Принимая во внимание тот факт, что само по себе применение электропривода переменного тока в ГТК снижает затраты на обслуживание и эксплуатационные затраты, возникает вопрос их квалифицированного обслуживания, при том, что модели приводов и их состав варьируется, не говоря уже о разности в структурах электроприводов самосвала и экскаватора. Логичным будет вопрос унификации типа электромеханического оборудования, комплектуемого для электропривода ГТК, учитывая схожесть режимов их работы и условия эксплуатации. При разработке новых изделий используют приемы унификации, агрегатирования и типизации, что существенно сокращает сроки и стоимость их разработки и обеспечивает соответствие требованиям стандартов [3].

Унификация — это рациональное сокращение видов, типов и размеров изделий одинакового функционального назначения. Унифицированным является изделие, созданное на базе нескольких ранее существовавших различных его исполнений путем приведения к единому исполнению, заменяющему любое из них [3].

Степень унификации оценивается степенью насыщенности нового или проектируемого изделия элементами других изделий, уже освоенных в производстве. Высокая степень унификации обеспечивает возможность сокращения сроков проектирования и изготовления изделий, повышения

производительности труда, увеличения гибкости и мобильности производства при переходе на выпуск новых видов продукции, а также повышения качества, надежности и долговечности изготавливаемых изделий. Унификация позволяет также снизить стоимость производства новых изделий, повысить уровень автоматизации производственных процессов, расширить специализированное производство.

Объектами унификации могут являться модули и блоки комплектных устройств, сборочные единицы, готовые изделия, технологические процессы, управляющие и информационные системы, технические требования, правила эксплуатации, термины и определения, системы документации и т.д. Унификация изделий осуществляется на основе определенного подобия выполняемых ими функций. Унификация изделий, целесообразность которой экономически обоснована, должна завершаться стандартизацией этих изделий.

Касаемо самосвалов и экскаваторов, унификация в составе их электромеханического оборудования даст возможность упростить обслуживание, снизить стоимость при производстве машин и на запасные части, повысить надежность. Рассматривать возможность унификации необходимо, прежде всего, в структуре и алгоритмах системы управления приводом. Анализ ассортимента существующих экскаваторов и самосвалов, разработанных с применением электропривода переменного тока, позволяет сказать, что основные электроприводы экскаваторов и мотор–колес самосвалов имеют схожие параметры. Сопоставление данных машин по их параметрам показало, что машины, имеющие близкие по мощности электроприводы совпадают и по грузоподъемности, и по вместимости ковша для связи их в горно–транспортный комплекс. Связав машины в комплекс, мы получим существенный экономический эффект от их совместной эксплуатации, поскольку обслуживание комплекса, имеющего схожее

оборудование и систему управления электроприводом позволит сэкономить и на запасных частях, и на персонале обслуживающем комплекс.

В этой связи в указанной области существуют значительные резервы для снижения издержек производства, которые можно использовать путем разработки и реализации унифицированного подхода к проектированию и диагностике электромеханического оборудования для повышения эффективности функционирования горно–транспортного комплекса добывающих предприятий.

1.3 ОПТИМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГТК

Применительно к карьерной технике, ресурс – это наработка от момента ввода ее в эксплуатацию до списания. Предельное состояние машины определяется следующими факторами: невозможностью поддержания безопасности, безотказности или эффективности применения объекта на допустимом уровне и износом или старением объекта, когда для ремонта требуются недопустимо большие затраты или он не обеспечивает необходимой степени восстановления работоспособности. Срок службы самосвала и экскаватора – важнейший показатель, характеризующий такое свойство надежности объекта, как долговечность.

Таким образом, ресурс и срок службы карьерной техники - это два различных показателя, характеризующих одно и то же свойство надежности – долговечность.

Срок службы – вторичный показатель, он определяется ресурсом:

$$n_{ГТК} = \frac{R_н}{R_{ср.г}} \quad , \tag{1.1}$$

где

$R_н$ – нормативный 90% ресурс, м.ч;

$R_{ср.г}$ – среднегодовая наработка ГТК, м.ч.

По показателю долговечности ГТК «срок службы» удобен также для перспективного планирования и комплектования парка самосвалов и экскаваторов горного предприятия.

Ресурс ГТК рассматривается как запас возможной наработки в вероятностном аспекте. Как правило, предельное состояние машины

соответствует состоянию ее опорных металлоконструкций, двигателя, приводов, и технико – экономической целесообразности их восстановления в конкретных условиях эксплуатации.

Эксплуатационный ресурс представляет собой характеристику эксплуатируемой, серийно выпускаемой машины и определяется фактическим режимом ее нагружения. При эксплуатации большое внимание на ресурс машины оказывает процесс изнашивания деталей. Поэтому рассмотрение основных закономерностей этого процесса и установление зависимости надежности машины от износа или старения ее деталей, лимитирующих ресурс всей машины в зависимости от реальных условий эксплуатации, является важной не только научной, но и практической задачей.

Используемая на добывающих предприятиях МСК и ТЭК при эксплуатации добычного комплекса (самосвалов и экскаваторов) система планово–предупредительных ремонтов (ППР) и обслуживания по наработке оборудованием определенного числа мотор–часов, является низкоэффективной ввиду того, что ремонты производятся по заранее запланированным графикам или по подсчету выработки часов оборудования. По этой причине возрастает риск возникновения неучтенных повреждений. С другой стороны, неоправданные ППР на исправном оборудовании ведут к повышению эксплуатационных затрат, повышению потерь производственного времени (в среднем тратится три смены в месяц на обслуживание оборудования при отсутствии неисправностей). К тому же, качество самих ППР находится на недостаточно высоком уровне. Структура обслуживания по системе ППР электромеханического оборудования экскаваторов и самосвалов, при возникновении серьезных повреждений, в упрощенном варианте представлена на рисунке 1.2.

Рисунок 1.2 – Структура проведения ППР в упрощенном виде

Как видно из рисунка, в результате проведения ППР по регламенту, возникает простой оборудования и потеря рабочего времени на стадии заказа и ожидания запчастей, если таковых нет на складе. Поскольку сами ППР занимают определенное время, и при возникновении серьезных неполадок оборудование приходится останавливать на длительный срок, это вызывает серьезные потери времени, а, следовательно, и снижение добычи, и экономические издержки. Та же ситуации и при внезапном возникновении серьезной аварии. Вышеперечисленное указывает на нецелесообразность применения существующей системы обслуживания и на необходимость создания новой. В качестве такой системы может быть использована система обслуживания по фактическому состоянию с использованием непрерывной автоматической диспетчеризации и диагностики по электрическим параметрам электромеханического оборудования, которая позволит оптимизировать материально-технические затраты и уменьшить потери, обусловленные плановыми простоями и необходимостью проведения

внеплановых ремонтов. Кроме того, такая система позволит предотвратить аварийные ситуации, которые влекут за собой долгосрочные ремонты оборудования или его полный выход из строя, не говоря уже об опасности, которую представляет серьезная авария на большегрузной технике. Суть алгоритма проведения ремонтов оборудования по принципу непрерывной диагностики и оценки остаточного ресурса в упрощенном виде изложена на рисунке 1.3.

Реализовывать указанный принцип возможно посредством создания алгоритмов диагностирования оборудования, непрерывной диспетчеризации работы машин и применения новейших датчиков и считывающих устройств, учитывающих текущее состояние оборудования.

Оценка технического состояния должна производиться на основе многофакторного анализа: зависимостей напряжения и тока от времени, потребляемых электродвигателем; мгновенных мощностей каждой фазы; спектрального анализа полученных сигналов напряжения, тока и мощности; коэффициентов несимметрии (тока, напряжений, мощности); коэффициентов гармоник (тока и мощности); отдаваемой мощности электропривода; задания выходной координаты; величины потерь электрической энергии.

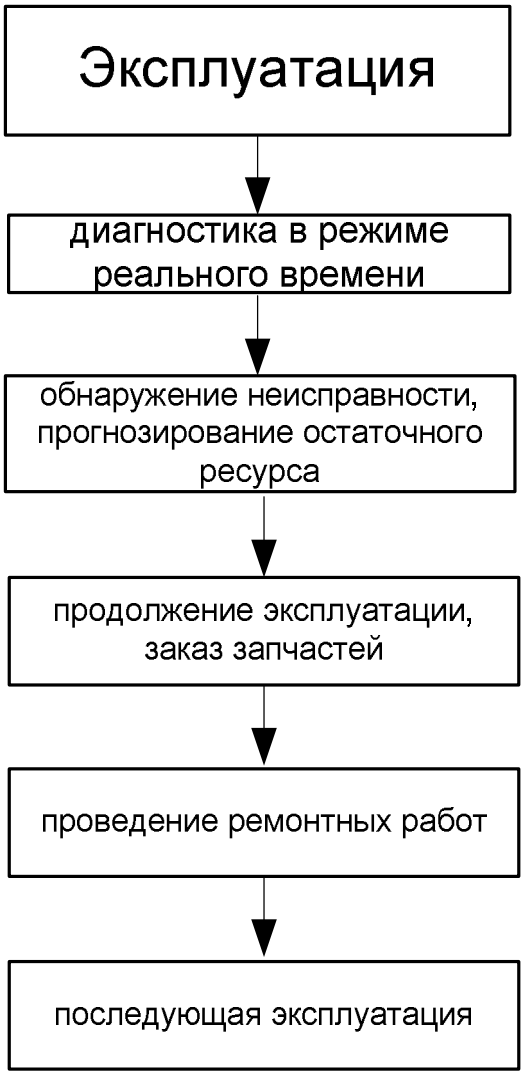

Рисунок 1.3 – Организация системы обслуживания по фактическому состоянию

При этом необходимо учитывать, при каких условиях работы были сделаны замеры (момент двигателя, частота вращения вала двигателя).

Диагностика осуществляется методами непрерывной диспетчеризации и записи диагностических параметров от датчиков и анализаторов качества электроэнергии питания двигателя в базу данных. Закономерности возникающих повреждений на исследуемом оборудовании индивидуальны для каждого конкретного электропривода. Зависимость повреждений от спектрального состава напряжения, тока и мощности, может быть выявлена только после анализа возникновения подобных

неисправностей на похожем оборудовании, данные о которых хранятся в общей базе данных.

Данный способ можно использовать и для определения состояния системы управления приводом. По спектрам тока и напряжения возможно определить точность открывания ключей инвертора и выявить выход их из строя.

Для более точного определения состояния оборудования составляется база данных повреждений, с использованием которой выполняется оценка технического состояния. Такая база сможет работать по принципу fuzzy-логики (нечеткой логики) и при возникновении первых признаков конкретного типа неисправности, путем сравнения эталонных значений и полученных на похожем оборудовании, будет выводить отчет о состоянии и остаточном ресурсе диагностируемого оборудования. При вводе нового оборудования в эксплуатации диагностируются все его параметры. Эти показания считаются эталонными для данного типа оборудования. Затем в процессе работы отслеживаются все значения питающего напряжения, тока, мощности и гармонического состава напряжения. При возникновении неисправности анализируются показания приборов и отслеживается тренд развития неисправности в функции времени. Тренды записываются в качестве термов–множеств (лингвистических переменных) соответствующего показания, и на основании этого делается вывод о наличии неисправности. В процессе обработки рассматривается совокупность сигналов, соответствующих неисправности, т.е. при возникновении группы показателей в соответствующем тренде мы можем сделать вывод о наличии отклонения от нормативных (эталонных) значений. Отчеты о возникших неисправностях и их тренды развития формируются в отчет по работе оборудования и после дополнительной обработки заносятся в общую базу знаний по данному типу оборудования. База знаний состоит из r правил, и строится по иерархическому принципу.

При раннем выявлении неисправности (износе оборудования) можно будет предупредить серьезные поломки, а также заказать запасные части заранее, что немаловажно для горнодобывающих предприятий, расположенных в отдаленных районах, где доставка запчастей от сервисного центра занимает значительное время.

Экономическая эффективность от внедрения систем непрерывной диагностики и диспетчеризации различного оборудования может быть доказана путем сравнения нескольких вариантов эксплуатации. Основными показателями, определяющими целесообразность внедрения системы технической диагностики, являются:

– прогнозируемое снижение величины риска отказа;

– снижение себестоимости продукции за счет экономического эффекта при техническом обслуживании.

В [30] приведены удельные эксплуатационные затраты различных производственных секторов при использовании различных моделей обслуживания оборудования (рисунок 1.4).

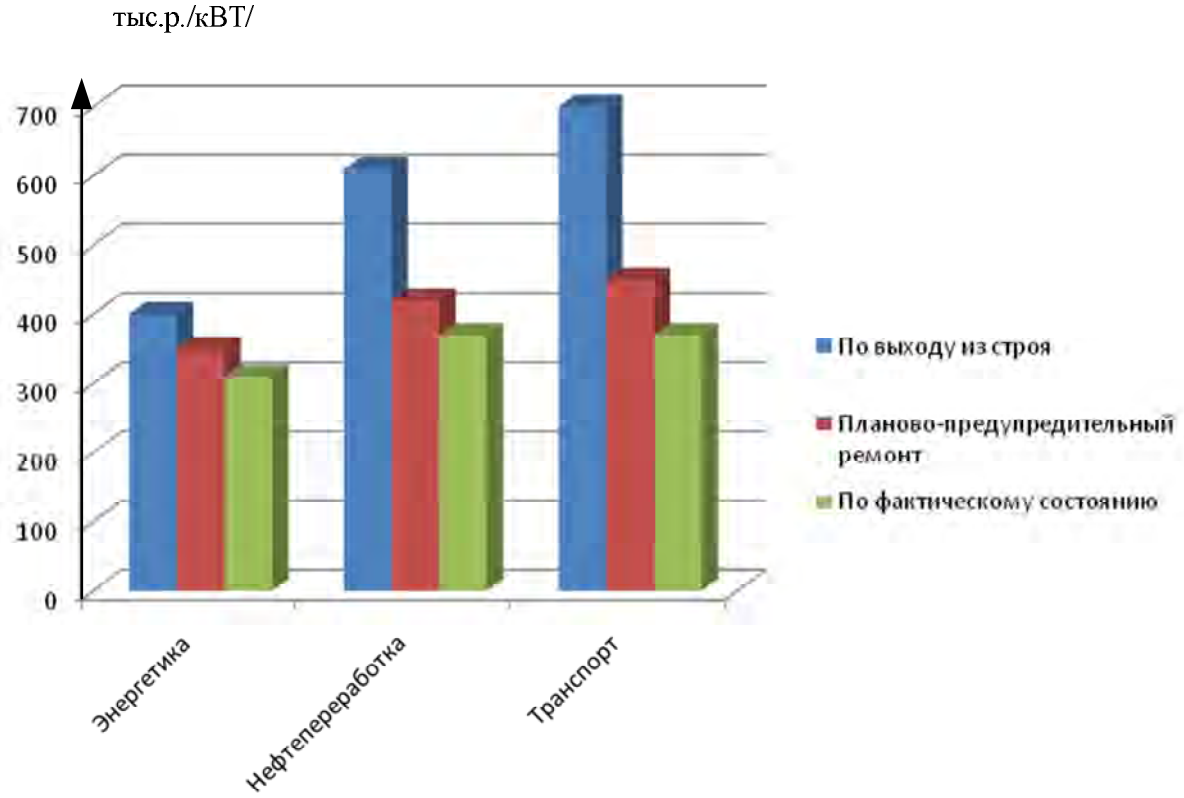

Рисунок 1.4 – Удельные эксплуатационные затраты различных производственных секторов на обслуживание основного оборудования

Из диаграммы видно, что обслуживание основного оборудования по его фактическому состоянию является наиболее выгодным для предприятий, при условии, что не снижается уровень безопасности объекта, характеризуемый показателем риска.

Исходя из этого можно сделать вывод о целесообразности применения системы обслуживания оборудования по фактическому состоянию с применением непрерывной диагностики и мониторнга на электромеханическом оборудовании ГТК.

1.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Повышение эффективности работы добычного оборудования, при открытых горных работах необходимо достигать исходя из времени его эффективного использования путем формирования горно–транспортных комплексов по принципу обеспечения наименьшего числа циклов экскавации для погрузки одного самосвала.

2. Создание комплекса экскаватор–самосвал с обеспечением максимальной степени унификации в части структуры ЭП на основе асинхронного двигателя с применением единых алгоритмов управления обеспечивает экономический и эксплуатационный эффект для предприятий, ведущих добычу открытым способом.

3. При обслуживании электромеханического оборудования ГТК целесообразно использовать систему обслуживания по фактическому состоянию с применением систем непрерывного мониторинга и диагностики взамен существующей системы обслуживания по графикам планово–предупредительных работ. Диагностировать состояние двигателей целесообразнее посредством измерения и анализа кривых тока, напряжения и мощности, поскольку данный метод не требует непосредственного доступа к оборудованию.

2 УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ГОРНО–ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

На сегодняшний день системы электроприводов горно–транспортного комплекса имеют различные решения по исполнению, типу преобразователей, типу двигателей, роду потребляемого двигателями тока (переменный или постоянный) и т.д., что влечет за собой необходимость применения различных подходов к настройке и обслуживанию электромеханического оборудования. Соответственно, растут эксплуатационные затраты, связанные с необходимостью обучения персонала по обслуживанию электроприводов (ЭП) машин горно–транспортного комплекса. Далее рассмотрены основные типы ЭП самосвалов и экскаваторов.

2.1 СПЕЦИФИКА И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА СОВРЕМЕННЫХ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ САМОСВАЛАХ И ЭКСКАВАТОРАХ

Существующие системы электропривода карьерных самосвалов

Самой распространенной системой электропривода карьерных самосвалов на сегодняшний день, является электромеханическая трансмиссия по системе переменно–постоянного тока на основе двигателей постоянного тока (ДПТ). Основными недостатками применения ДПТ являются большие массо–габаритные размеры и наличие щеточно–коллекторного узла, требующего больших затрат при эксплуатации, а также нецелесообразность их применения на самосвалах грузоподъемностью свыше 200 т.

Существуют примеры электроприводов самосвалов на основе вентильных двигателей с системой возбуждения, основанной на постоянных магнитах. Такой электропривод имеет ряд преимуществ, связанных с обеспечением плавности регулирования частоты вращения вала двигателя, высоким КПД (около 94,5%), отсутствием щеточно–коллекторного механизма и возможность применения одноступенчатого редуктора. Опытные образцы самосвалов с таким типом электропривода были произведены и эксплуатировались на разрезах России. Несмотря на все преимущества, вентильные электроприводы имеют очень существенные недостатки, связанные с высокой стоимостью самих двигателей и чувствительностью постоянных магнитов к температурному режиму. Именно поэтому большинство производителей транспортных машин перешли к реализации тяговых электроприводов на базе асинхронного двигателя. Развитие силовых полупроводниковых приборов и микропроцессорных систем управления позволило реализовать неразрешимую ранее задачу – создать тяговый привод для карьерных самосвалов особо большой

грузоподъемности, конкурентный по цене, не уступающий или превосходящий по тягово–динамическим характеристикам приводы постоянного тока и обладающий широкими возможностями в части оптимизации алгоритмов управления. Достоинства и недостатки различных типов трансмиссий карьерных автосамосвалов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Достоинства и недостатки различных типов трансмиссий карьерных автосамосвалов

Тип привода	Достоинства	Недостатки
Гидромеханическая трансмиссия	Простота конструкции и обслуживания	Повышенный расход топлива, необходимость в ГСМ, большие эксплуатационные расходы, низкий ресурс
ЭМТ с применением двигателей постоянного тока	Плавность хода, высокий момент на низких оборотах, привычная для эксплуатации конструкция	Наличие коллекторно-щеточного аппарата, нецелесообразность применения для самосвалов грузоподъемностью свыше 200 т, большие массогабаритные размеры
ЭМТ с применением вентильных двигателей	Плавность регулирования частоты вращения вала двигателя, постоянство момента на валу двигателя, высокий КПД, возможность применения одноступенчатого редуктора	Высокая стоимость, связанная с использованием постоянных магнитов, чувствительность постоянных магнитов к температурному режиму
ЭМТ с применением частотно управляемого привода на основе АД	Отсутствие щеточно–коллекторного аппарата, меньшие массогабаритные размеры, высокие энергетические показатели, хорошие тягово–динамические показатели	-

Применение тягового электропривода переменного тока на самосвалах всего диапазона грузоподъемностей позволяет сократить массогабаритные размеры самосвалов, тем самым повысив показатели габаритной мощности, которая определяется соотношением мощности трансмиссии к тяговому усилию кВт / кг [46,74]:

$$P_{тр}/F\ , \qquad (2.1)$$

где

$P_{тр}$ – максимальная мощность трансмиссии во всем диапазоне скоростей;

F – максимальное тяговое усилие при нулевой и минимальной скорости.

Этот показатель определят соотношение габаритных размеров и массу узлов трансмиссии, в первую очередь тяговых двигателей. Удельная масса для электротрансмиссии с применением тяговых электродвигателей переменного тока составляет до 7 кг массы приходящихся на 1 кВт мощности двигателя.

Одним из наиболее распространенных современных самосвалов, на котором применяется трансмиссия с использованием электропривода переменного тока, является самосвал БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т. Он имеет ряд особенностей [46]:

– в качестве источника питания применен одноопорный синхронный генератор переменного тока с обмоткой самовозбуждения, унифицированный по габаритным размерам для установки с разными дизельными двигателями;

– силовая цепь электропривода выполнена по схеме «электрического дифференциала», в которой обеспечивается принудительное равенство их токов и моментов, что улучшает управляемость самосвала в режиме поворота, уменьшает износ шин, повышает ресурс тяговых электродвигателей;

– в электроприводе предусмотрено плавное, бесконтактное автоматическое регулирование частоты вращения двигателя;

– обеспечивается расширенный диапазон эффективного электрического торможения в обоих направлениях при движении на малых скоростях с сохранением значительного тормозного усилия даже при полной

остановке самосвала, что существенно снижает эксплуатационные расходы на обслуживание механической системы тормозов;

– имеется эффективная защита от буксования и юза мотор-колес;

– предусмотрена возможность оперативного обнаружения участка силовой цепи, имеющей связь с корпусом самосвала;

– предусмотрена возможность контроля параметров внешней характеристики дизель–генератора путем нагружения генератора на собственные тормозные резисторы;

– осуществляется непрерывная диагностика состояния тягового электропривода.

Экономическая целесообразность применения приводов переменного тока на карьерных самосвалах грузоподъемностью более 250 метрических тонн сегодня очевидна ввиду устойчивой тенденции снижения стоимости силовых полупроводниковых приборов и конденсаторов, составляющих основные затраты на инвертор.

Существующие системы электропривода карьерных экскаваторов

В настоящее время на карьерных экскаваторах применяются электроприводы различного типа. Классическими ЭП для привода главных механизмов являются ЭП с применением двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, питаемых от регулируемых генераторов (система Г–Д) или регулируемых статических тиристорных преобразователей (система ТП–Д). Наряду с общепризнанными достоинствами системы Г–Д ее основными недостатками являются:

– наличие преобразовательного агрегата с вращающимися генераторами, обладающими значительной электромагнитной инерцией и подверженными износу подвижных частей, что вызывает необходимость систематических профилактических ремонтов;

– значительные потери электроэнергии;

– большие массогабаритные показатели;

– повышенные динамические нагрузки на электродвигатели и связанные с ними механизмы из-за недостаточного быстродействия системы Г–Д.

Тиристорные и транзисторные преобразователи (ТП–Д и ТрП–Д) лишены вышеперечисленных недостатков, однако в паре с ними также применяются двигатели постоянного тока для приводов основных механизмов экскаватора. Двигатели постоянного тока, в свою очередь, обладают рядом эксплуатационных недостатков, связанных с наличием щеточно–коллекторного узла. Это осложняется тяжелыми условиями работы экскаваторов при постоянной запыленности и перепадах температур от -50 до +50°С, в связи с чем снижается срок службы коллектора и щеток.

В системе «непосредственный преобразователь частоты–асинхронный двигатель» (НПЧ–АД) отсутствуют устройства искусственной коммутации (коммутация естественная) и применяются бесконтактные асинхронные двигатели, что является главным преимуществом перед другими существующими системами. К сожалению, система НПЧ–АД не получила распространения из–за невозможности получения выходной частоты выше частоты $0{,}5*f_{ном}$, необходимости использования асинхронных двигателей особой конструкции, способных работать на номинальной частоте 25 Гц, больших массогабаритных размеров двигателей и преобразователя.

С недавних пор началась активная разработка экскаваторного электропривода с применением системы «преобразователь частоты–асинхронный двигатель» ПЧ–АД. Применение бесконтактных асинхронных электродвигателей позволяет снизить эксплуатационные затраты и повысить надежность систем электропривода главных механизмов экскаватора и самосвала. При этом асинхронный электропривод обладает меньшем энергопотреблении (до 30%) и меньшими массогабаритными размерами. В

таблице 2.2 представлены основные достоинства и недостатки существующих систем ЭП экскаваторов.

Таблица 2.2 – Основные достоинства и недостатки существующих систем ЭП карьерных экскаваторов

Тип привода	Достоинства	Недостатки
Привод постоянного тока система Г-Д	Привычная для эксплуатации конструкция, в связи с чем быстрая локализация отказов	Наличие коллекторно-щеточного аппарата, большое количество подшипниковых узлов, большие пусковые токи в питающей линии, большие массогабаритные показатели, низкое быстродействие системы
Привод постоянного тока система ТП-Д	Отсутствует генераторная группа, доступность комплектующих, используемых в приводе	Наличие коллекторно-щеточного аппарата, необходимость применять сложные и дорогие ФКУ для компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения
Привод постоянного тока система ТрП-Д	Отсутствует генераторная группа, применение уже выпускаемых экскаваторных двигателей постоянного тока	Наличие коллекторно-щеточного аппарата, необходимость подготовки обслуживающего персонала
Электропривод переменного тока система НПЧ–АД	Отсутствуют устройства искусственной коммутации, возможность применения бесконтактных асинхронных двигателей	Невозможность получения частоты выше 0,5 *$f_{ном}$, необходимость применения нестандартных двигателей, способных работать на номинальной частоте $f_{ном}$ =25 Гц, большие массогабаритные размеры двигателей и преобразователей
Электропривод переменного тока система ПЧ–АД (с применением активного выпрямителя)	Отсутствие генераторной группы, отсутствие щеточно–коллекторного аппарата, меньшие массогабаритные размеры, высокие энергетические показатели, рекуперация энергии в питающую сеть	–

Стоит также отметить, что использование системы ПЧ–АД в паре с активным выпрямителем позволяет рекуперировать энергию обратно в питающую сеть, обеспечивать электромагнитную совместимость электроприводов с электросетью и коэффициент мощности, близкий к единице.

В последние года все больше зарубежных и отечественных производителей экскаваторной техники отдают предпочтение электроприводам переменного тока с применением асинхронных двигателей. На ООО «ИЗ–КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова» разработан и произведен первый в России карьерный экскаватор с применением ЭП переменного тока с цифровой системой управления. Сейчас он успешно работает на разрезе «Краснобродский» компании ОАО «Кузбассразрезуголь».

На рисунках 2.1 и 2.2 приведены электрические схемы электроприводов переменного тока экскаваторов и самосвалов. Оба привода выполнены с применением асинхронных двигателей и построены по системе ПЧ–АД.

Схемы приводов имеют схожую структуру и элементную базу. Как видно из рисунков, разница структуры состоит только в способе получения питающего напряжения: экскаватор получает питание от высоковольтной линии 6 кВ, подхоящей к нему в виде гибкого кабеля; самосвал получает питание от синхронного генератора *СГ*, приводимого во вращение дизельным двигателем.

Приводы содержат в своем составе выпрямитель и двухуровневый автономный инвертор напряжения. Применение активного выпрямителя (АВ) (состоящего из четырех секций преобразователей, конденсаторной секции и 24-х дросселей) в схемах электропривода экскаватора обусловлено его возможностью обеспечивать значение коэффициента мощности, близкого к единице, меньший коэффициент нелинейных искажений (по сравнению с диодным многопульсным выпрямителем), а также возможность работы во всех четырех квадрантах механической характеристики с автоматической рекуперацией энергии в питающую сеть. В активном выпрямителе дроссели и секция конденсаторов СК являются фильтром между трансформатором и секциями активного выпрямителя.

На самосвале в качестве преобразователя устанавливается диодный многопульсный выпрямитель.

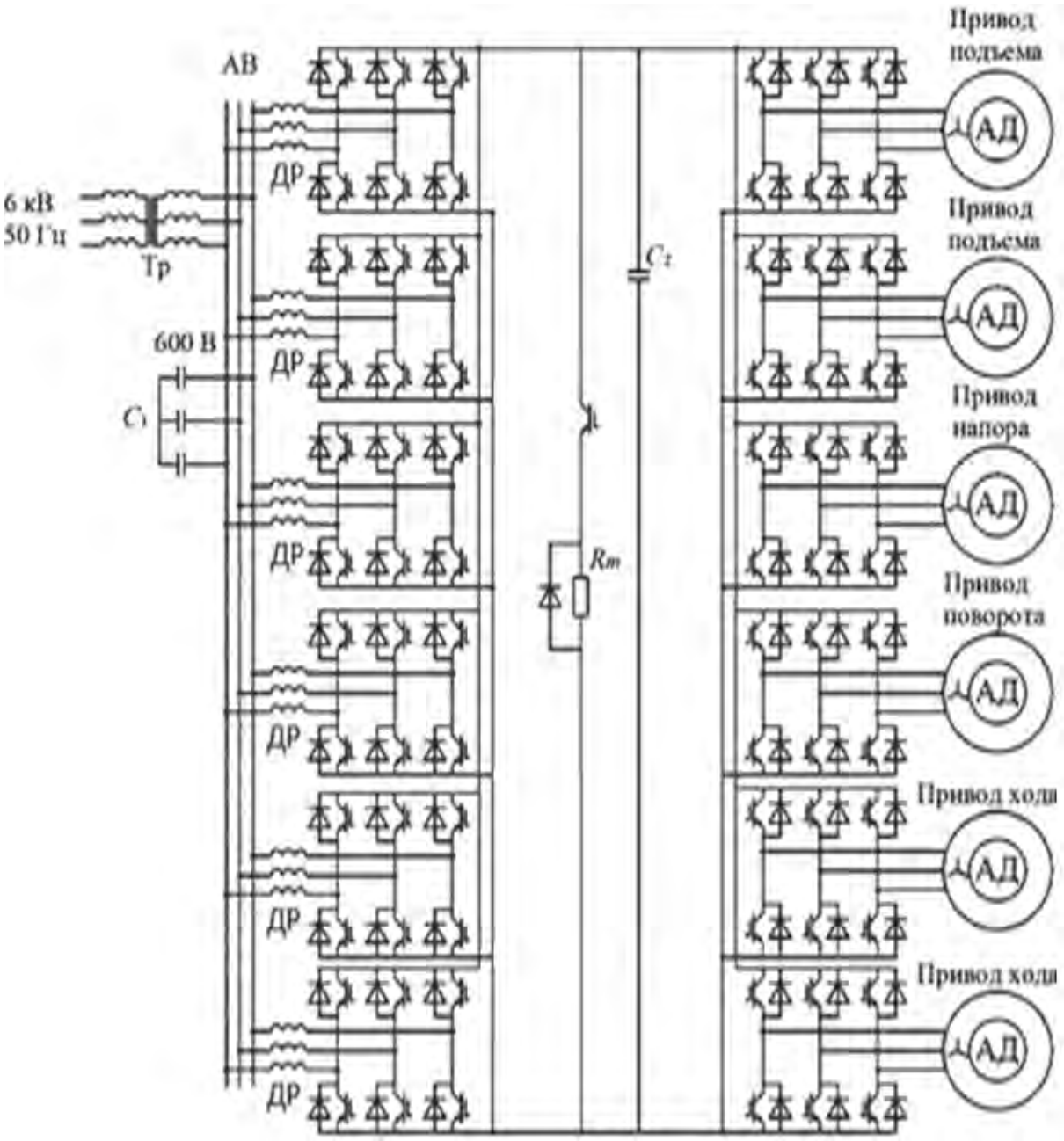

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема электроприводов переменного тока экскаватора ЭКГ 32 Р

ТР–вводной трансформатор экскаватора; *АВ*–активный выпрямитель; *ИН*–инвертор напряжения; *АД*–асинхронный двигатель; *ДР*–дроссель.

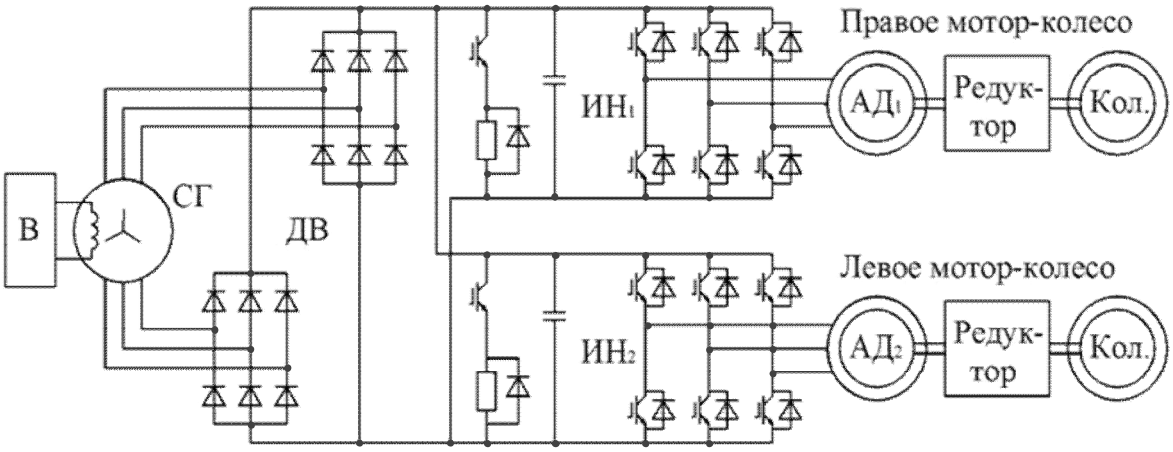

Рисунок 2.2 – Принципиальная схема электропривода мотор–колес самосвала «БелАЗ» грузоподъемностью 130–240 т

ДВ–диодный выпрямитель; *СГ*–синхронный генератор; *ИН*–инвертор напряжения; *В*–возбудитель; *АД*–асинхронный двигатель; *Кол.*–колесо самосвала

Преобразование постоянного напряжения в выходное трехфазное переменное в электроприводе экскаватора осуществляет мостовой транзисторный инвертор напряжения, собранный из шести IGBT-модулей, конструктивно представляющие из себя блок силовых фаз A, B, C.

"Фаза инвертора" включает в себя два IGBT–модуля и два драйвера. Драйвер представляет собой электронную панель, которая формирует импульсы управления необходимого для IGBT–транзисторов уровня, поступающих от панели с микроконтроллером и передающих обратно сигнал о состоянии (исправности) IGBT–транзистора.

Связь между процессорной системой управления и драйверами осуществляется по оптоволоконным каналам. Управление транзисторами происходит по принципу широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В каждой паре транзисторных ключей, представляющих собой фазы инвертора, происходит поочередное подключение выходной (фазной) шины к плюсу и к минусу звена постоянного тока за счет открывания и закрывания

соответствующих ключей. Указанное поочередное подключение происходит с высокой (в нашем случае f=1,5 кГц) частотой, причем относительная длительность подключения к плюсу (минусу) может плавно увеличиваться (уменьшаться). Средняя величина напряжения на каждом из трех фазных выходов инвертора может, таким образом, плавно регулироваться от максимального положительного значения (фаза постоянно подключена к плюсу) до максимального отрицательного (фаза постоянно подключена к минусу). Для частотного управления трехфазными асинхронными двигателями используется синусоидальная ШИМ со сдвигом 120° между фазами инвертора и одновременным для всех фаз регулированием амплитуды и частоты основной гармоники напряжения. Электропривод подъема включает в себя два двигателя подъема, каждый двигатель питается от двух параллельно работающих силовых инверторных секций.

Схема управления активным выпрямителем построена по векторному принципу с ориентацией по вектору напряжения сети.

Особенности режимов работы некоторых приводов экскаватора – ударные нагрузки, влекущие большие броски потребляемого двигателем тока ($I_к = 3 \div 4I_{ном}$), соответственно, необходимость их ограничения определяет высокие требования по максимальному быстродействию в контуре тока (момента). К сожалению, применяемая сегодня на экскаваторах и самосвалах система векторного управления двигателем не обеспечивает необходимого быстродействия (время реакции системы на изменение момента на валу двигателя составляет 100–200 мс) ввиду большого количества вычислений координат, что является неприемлемым для главных приводов экскаватора и самосвала.

2.2 УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ГТК

В качестве объекта унификации выбрана структура и алгоритмы управления электроприводов горно–транспортного комплекса. Электроприводы экскаваторов и самосвалов, эксплуатируемые на горных предприятиях и имеющие различную структуру, влекут серьезный рост эксплуатационных расходов ввиду отсутствия единой системы обслуживания и необходимости содержания большого количества обслуживающего персонала различной квалификации.

На наш взгляд, для обеспечения максимальной степени унификации и снижения производственных и эксплуатационных затрат на обслуживание ГТК оптимальной функциональной структурой электропривода будет являться структура, указанная на рисунках 2.3 и 2.4. Из рисунков видно, что предполагается использование одного типа электропривода переменного тока на основе бесконтактного асинхронного двигателя (АД), транзисторного инвертора напряжения (ИН) и микропроцессорной системы управления (СУ) с общими алгоритмами формирования напряжения питания двигателя для всех типов электроприводов, но с различными настройками под характерные режимы работы. Разница структуры приводов будет состоять только в способе получения питающего напряжения: экскаватор получает питание от высоковольтной линии 6 кВ, подхоящей к нему в виде гибкого кабеля; самосвал получает питание от синхронного генератора *СГ*, приводимого во вращение дизельным двигателем.

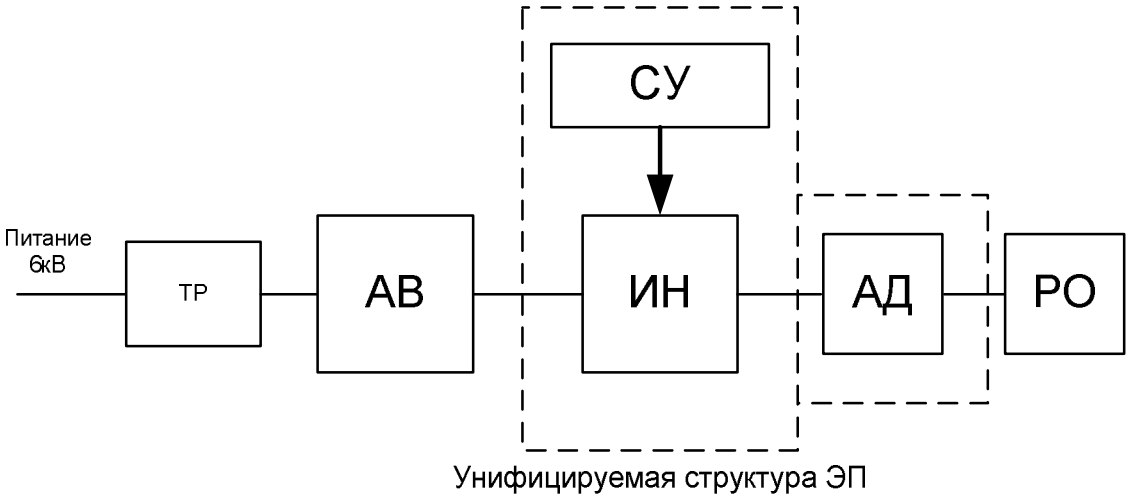

Рисунок 2.3 – Структура ЭП экскаватора на основе асинхронного двигателя

ТР–вводной трансформатор экскаватора; *АВ*–активный выпрямитель; *ИН*–инвертор напряжения; *АД*–асинхронный двигатель; *СУ*-система управления; *РО*–рабочий орган машины

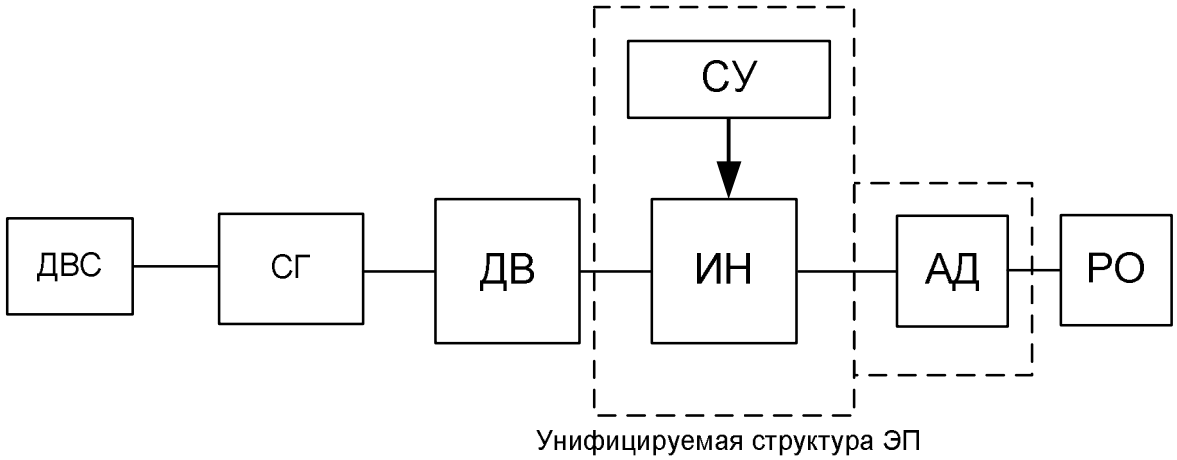

Рисунок 2.4 – Структура ЭП мотор–колес самосвалов БелАЗ на основе асинхронного двигателя

ДВС–дизельный двигатель; *СГ*–синхронный генератор; *ДВ*–диодный выпрямитель

В системах управления электроприводами может быть реализован один из следующих способов формирования напряжения питания двигателя: PWM (Pulse Width Modulation), SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), DTC (Direct Torque Control) [19].

Способ формирования напряжения с помощью PWM требует постоянной частоты переключения ключей инвертора. Кроме того, для нормальной работы двигателя выпрямленное напряжение на входе инвертора должно в 2 раза превышать амплитудное значение фазного напряжения двигателя (включенного в «звезду») [19]. Этот способ широко применяется, ввиду простоты его реализации и благодаря плавности вращения вектора напряжения.

Способ формирования напряжения с помощью SWPWM обеспечивает более эффективное использование напряжения питания по сравнению с PWM. Годограф вектора напряжения при обычной синусоидальной широтно-импульсной модуляции, в которой синусоидальные сигналы сравниваются с пилообразной несущей, имеет вид круга радиусом $0{,}5U_{d0}$. При пространственно-векторной модуляции длина каждого из шести векторов равна $2/3U_{d0}$, при этом годограф вектора напряжения в установившемся режиме представляет собой круг, вписанный в шестиугольник, радиусом $U_{d0}/\sqrt{3}$. Для формирования заданного пространственного вектора напряжения необходимо знать его угловое положение, чтобы определить номера смежных векторов. Время цикла $T_ц$ выбирается, исходя из желаемой частоты переключения ключей инвертора. Чтобы вычислить времена включения t_1 и t_2 , зная смежные вектора U_1 и U_2, необходимо:

$$U_{зад} = U_1 \frac{t_1}{T_ц} + U_2 \frac{t_2}{T_ц} \tag{2.2}$$

тогда как:

$$t_1 = \frac{2T_ц}{\sqrt{3}U_d^2}\left(U_{задα}U_{2β} - U_{задβ}U_{2α}\right)$$

$$t_2 = \frac{2T_ц}{\sqrt{3}U_d^2}\left(U_{задβ}U_{1α} - U_{задα}U_{1β}\right)$$

Для реализации этого способа необходимо вычислить требуемые проекции вектора напряжения в неподвижных осях. Эти проекции можно получить в векторной системе управления или в системе, непосредственно вычисляющей их. По сравнению с PWM система SVPWM позволяет плавно вращать вектор напряжения при меньшей частоте переключения ключей инвертора. В частности, сейчас на экскаваторе ЭКГ 32Р реализован векторный способ формирования напряжения.

Ранее в различной литературе [28] были рассмотрены структуры электропривода с применением систем DTC, обеспечивающих максимальное быстродействие по контуру момента. Система формирования напряжения выполнена по алгоритму прямого управления моментом, имеет более простую процедуру настройки, в отличие от систем PWM и SVPWM, и содержит всего один ПИ-регулятор скорости.

В основу алгоритма прямого управления моментом положено уравнение электромагнитного момента АД:

$$m = \frac{3}{2} z_p \frac{k_1 k_2}{\sigma L_m} |\psi_1 * \psi_2| = \frac{3}{2} z_p \frac{k_1 k_2}{\sigma L_m} \psi_{1m} * \psi_{2m} sin\vartheta \ , \qquad (2.3)$$

где

ϑ – пространственный угол между векторами потокосцеплений ψ_1 и ψ_2;

Lm–полная взаимная индуктивность;

k1 и k2 – соответственно, коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора.

Способ формирования напряжения основан на табличном переключении ключей инвертора, при этом ключи переключаются релейными регуляторами, работающими в скользящем режиме. Управление электромагнитным моментом двигателя осуществляется за счет выбора вектора напряжения, обеспечивающего необходимый знак приращения

электромагнитного момента и одновременно – необходимый знак приращения модуля потокосцепления. В каждом из шести секторов (рисунок 2.5) существует определенный набор векторов напряжения для всех возможных комбинаций требуемых знаков изменения модуля потокосцепления и момента. В результате вращение вектора потокосцепления статора обеспечивается с требуемой частотой при поддержании модуля вектора потокосцепления на заданном уровне [20].

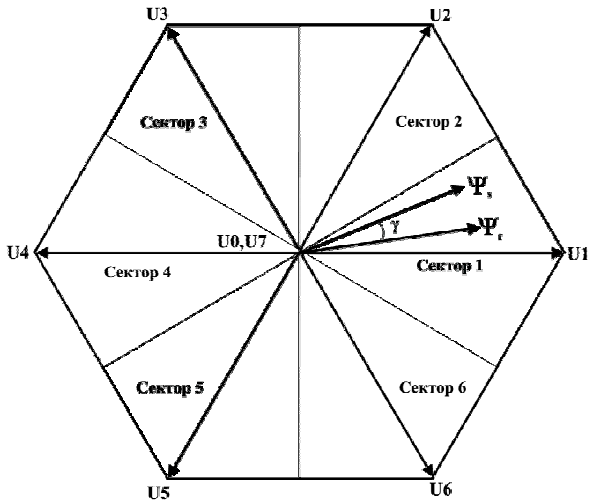

Рисунок 2.5 – Способ формирования напряжения в схеме с DTC

Вектор напряжения перемещается скачками, при этом ключи инвертора переключаются только тогда, когда рассогласования по моменту и потокосцеплению статора достигнут заданного уровня. Выбор соответствующего вектора напряжения основан на таблице коммутации. Входами для табличного определения вектора напряжения (положение ключей инвертора) являются угловой сектор положения вектора потокосцепления статора и выходы двух релейных гистерезисных регуляторов. Характеристики релейных регуляторов двух типов представлены на рисунке 2.6.

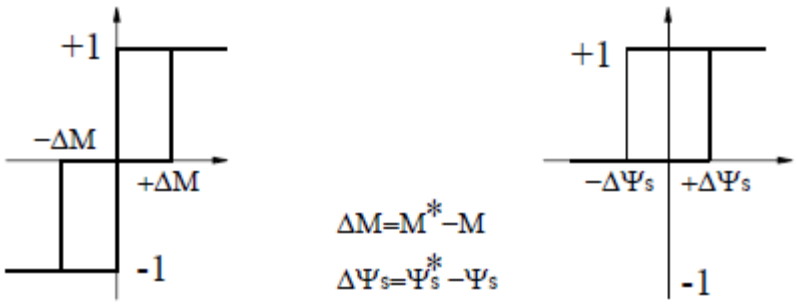

Рисунок 2.6 – Регуляторы момента и потокосцепления статора

В таблице 2.3 указаны условия выбора векторов напряжений [20].

Таблица 2.3 – Таблица выбора вектора напряжения

$\Delta\ \psi_s$	ΔM	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	Сектор 5	Сектор 6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	0	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7
	-1	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	-1	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

Состояния ключей инвертора определяются в соответствии с таблицей 2.4 при обозначениях, указанных на схеме (рисунок 2.7).

Таблица 2.4 – Таблица переключения транзисторов

	U_1	U_0	U_2	U_7	U_3	U_0	U_4	U_7	U_5	U_0	U_6	U_7
k_{A1}	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+
k_{A2}	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-
k_{B1}	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+
k_{B2}	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-
k_{C1}	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+
k_{C2}	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-

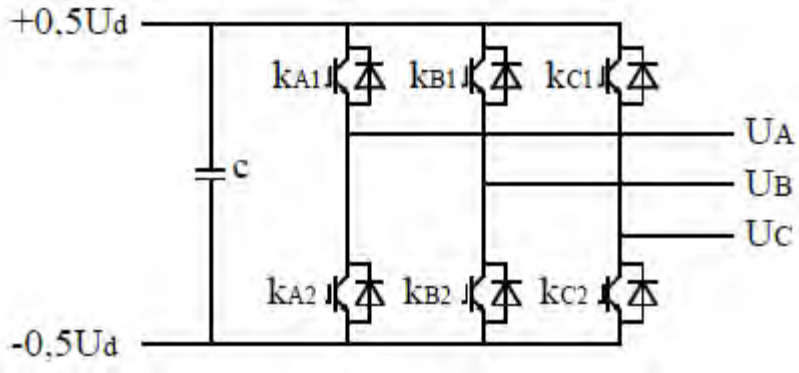

Рисунок 2.7 – Схема инвертора

В таблице 2.4 знак «+» соответствует включенному ключу, знак «–» – выключенному. В каждый момент времени любая фаза двигателя всегда подключена к плюсовой или минусовой шине выпрямителя.

Для реализации рассматриваемого способа управления определяется угловое положение вектора потокосцепления обмотки статора:

$$\varphi = arctg\left(\frac{\Psi_{s\alpha}}{\Psi_{s\beta}}\right), \tag{2.4}$$

где

$\Psi_{s\alpha}$ и $\Psi_{s\beta}$ – проекции вектора потокосцепления обмотки статора на оси α и β (определены ниже).

В зависимости от угла поворота вектора потокосцепления обмотки статора выбирается номер углового сектора [20]:

$$\left.\begin{array}{ll} если\ -\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{\pi}{6}, & то\ 1\ сектор \\ если\ -\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}, & то\ 2\ сектор \\ если\ \frac{5\pi}{6} < \varphi < -\frac{5\pi}{6}, & то\ 3\ сектор \\ если\ -\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{\pi}{6}, & то\ 4\ сектор \\ если\ -\frac{5\pi}{6} < \varphi < -\frac{\pi}{2}, & то\ 5\ сектор \\ если\ -\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{6}, & то\ 6\ сектор \end{array}\right\} \tag{2.5}$$

На рисунке 2.8 изображена структурная схема электропривода с системой прямого управления моментом.

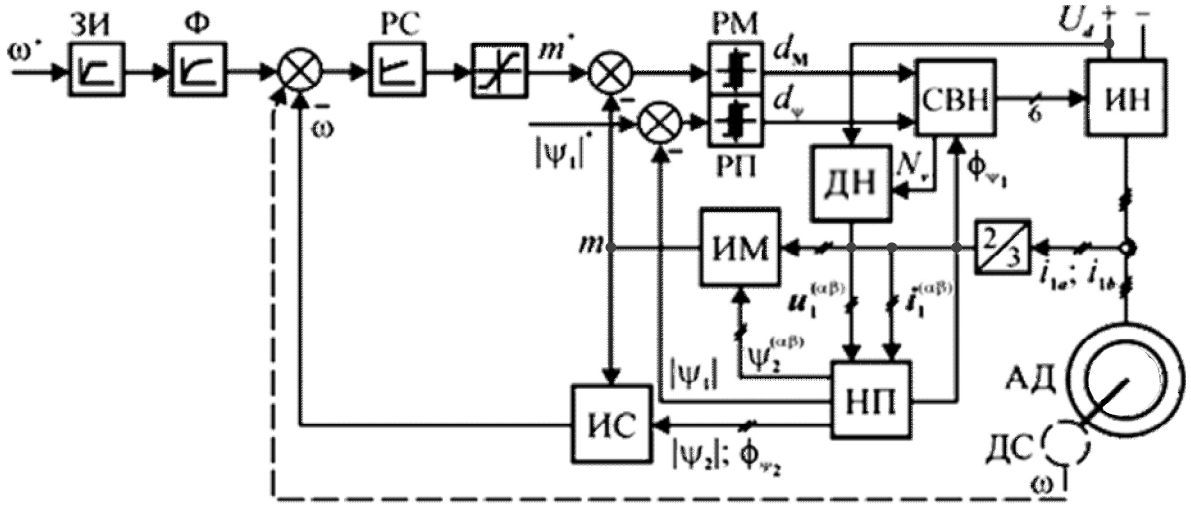

Рисунок 2.8 – Структурная схема электропривода с системой DTC

Схема имеет два канала управления скоростью вращения ω^* и модулем потокосцепления статора ψ_1^*. На входе канала управления скоростью установлен задатчик интенсивности (*ЗИ*), ограничивающий ускорение при разгоне и снижении скорости. Ограничение ускорений необходимо для уменьшения нагрузок на инвертор напряжения (*ИН*). При разгоне *ЗИ* ограничивает ток *ИН*, а при замедлении обеспечивает рассеяние или возврат энергии в источник. Как и в системе трансвекторного управления, для исключения значительного перерегулирования на выходе *ЗИ* целесообразно установить апериодический фильтр первого порядка (*Ф*). На выходе ПИ–регулятора скорости (*РС*) формируется сигнал задания момента m^*, ограниченный нелинейным звеном насыщения.

Идентификация потокосцеплений статора и ротора производится адаптивным наблюдателем (*НП*), в котором используется информация о текущих значениях токов и напряжении статора. Фазные токи i_{1a} и i_{1b} преобразуются в ортогональные проекции. Вектор напряжения статора $U_1^{|\alpha\beta|}$ определяется идентификатором напряжения (*ДН*) по номеру состояния

ключей инвертора (номеру базового вектора 0-7) и напряжению на входе инвертора U_d.

Полученные векторы $U_1^{\alpha\beta}$ и $i_1^{\alpha\beta}$ служат основой для вычислений координат векторов ψ_1 и ψ_2, а также текущих значений момента m и частоты вращения ω в соответствии с выражениями [98]:

$$\psi_1^{\alpha\beta} = \int (u_1^{\alpha\beta} - i_1^{\alpha\beta} r_1)\, dt; \tag{2.6}$$

$$\psi_2^{\alpha\beta} = (\psi_1^{\alpha\beta} - i_1^{\alpha\beta} \sigma L_1) L_2 / L_m; \tag{2.7}$$

$$m = \frac{3}{2} z_p (\psi_{1a} i_{1\beta} - \psi_{1\beta} i_{1a}); \tag{2.8}$$

$$\omega = \omega_1 - \frac{2 r_2 m}{3 z_p \left|\psi_2^{\alpha\beta}\right|^2} \tag{2.9}$$

В уравнениях момента и скорости используются средние за интервал дискретности вычислений значения ($\Delta t = t_2 - t_1$), а синхронная частота вращения определяется методом конечных разностей как:

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_2}{dt} \approx \frac{\varphi_2(t_2) - \varphi_2(t_1)}{\Delta t}; \tag{2.10}$$

Сигналы задания момента m^* и модуля потокосцепления статора $|\psi^*|$ сравниваются с текущими оценками m и ψ_1, после чего с помощью релейных регуляторов *РМ* и *РП* с гистерезисной характеристикой формируются логические сигналы ошибок этих величин. Величина гистерезиса характеристик регуляторов определяет допустимое отклонение от заданного значения, а также частоту коммутации ключей *ИН*. Поэтому, если требуется управление частотой коммутации при изменении частоты вращения магнитного поля или ее ограничение, то используют регуляторы момента и потока с управляемым гистерезисом.

Сигналы ошибок и текущего угла потокосцепления статора поступают на вход селектора вектора напряжения (*СВН*), который осуществляет управление ключами *ИН* в соответствии с таблицей переключений (таблица 2.3).

Сигналом обратной связи во внешнем контуре служит сигнал, поступающий с датчика частоты вращения двигателя. В системах DTC это либо измеренный сигнал на выходе вращающегося датчика частоты вращения ротора двигателя, либо вычисленный сигнал, пропорциональный частоте вращения ротора двигателя в так называемых бездатчиковых системах. Необходимо отметить, что используемый в литературе термин «бездатчиковый» («sensorless») относится только к вращающемуся датчику частоты вращения. Наличие в системах DTC датчиков напряжения и тока статора двигателя обязательно. Внутренние контуры регулирования в системе DTC представляют собой дискретную часть системы. Они содержат релейные регуляторы потокосцепления статора и электромагнитного момента двигателя. Эти регуляторы обязательно должны иметь гистерезисный допуск. В зарубежных публикациях такие регуляторы называются «hysteresis flux comparator» и «hysteresis torque comparator».

Большая перегрузочная способность электропривода при системе формирования напряжения по закону прямого управления моментом оказывает существенное влияние на выбор этого варианта по сравнению с другими известными схемами. Применение в каналах управления электроприводом релейных гистерезисных регуляторов момента и потокосцепления статора придает системам DTC свойства робастных систем. Системы электропривода переменного тока, в которых реализован алгоритм прямого управления моментом, обладают свойством инвариантности к изменениям момента нагрузки на валу двигателя. Кроме того, системы DTC обладают низкой чувствительностью к неточности информации о состоянии электропривода и механизма, вызванной неизбежными измерительными и

вычислительными ошибками. Поэтому система может быть успешно использована в составе широкого класса горных машин [28].

По условиям эксплуатации одноковшовые канатные экскаваторы (и не только они) работают в режиме частых пусков и торможений. В зависимости от экскаваторного типажа количество пусков, реверсов и торможений может достигать $N_{пуск}$= 200-250 в час [28].

Наиболее полно все перечисленные требования предъявляются к электроприводам главных механизмов одноковшовых карьерных экскаваторов. Карьерные экскаваторы – это горные машины циклического действия. Для двух из главных механизмов экскаватора, а именно, механизмов подъема и напора (для карьерных лопат) характерны экстремальные механические нагрузки, в том числе ударные. Вследствие этого движение ковша в забое отличается большой неравномерностью, вплоть до полного стопорения при встрече с непреодолимым препятствием. Некоторые из главных механизмов экскаватора оснащаются двухдвигательным электроприводом. В частности, это относится к механизмам хода и подъема экскаваторов ЭКГ–18, ЭКГ–20, ЭКГ 32Р, ЭКГ–50 [67].

Электроприводы всех главных механизмов экскаватора рассматриваются как многомассовые системы из–за наличия в кинематической части механизма ярко выраженных упругих элементов. Для механизма подъема это подъемный канат. Хотя рукоять экскаватора можно считать жестким элементом, у механизма напора необходимо учитывать жесткость канатов напорной лебедки или кремальерного механизма в зависимости от конструктивного исполнения. Механизм поворота платформы экскаватора также содержит упругие элементы из–за наличия в схеме длинных валов и люфтов в зубчатых передачах, имеющих зубья большого модуля. Кроме того, поскольку электропривод двухдвигательный,

необходимо учитывать возможную асимметрию в нагрузке двигателей несмотря на то, что они получают питание от разных инверторов. На работу экскаватора оказывает влияние ряд случайных факторов, которые возникают из–за неопределенности физико–механических свойств извлекаемой породы, состояния механической системы экскаватора (степень износа главных механизмов) и действий машиниста [28].

При упругой деформации механических элементов с низкой жесткостью, таких как канаты, длинные металлоконструкции (стрела, рукоять), длинные валы, в деформированных на растяжение и изгиб элементах запасается потенциальная энергия. Это приводит к появлению в металлоконструкциях механических колебаний, вызывающих значительные динамические перегрузки. При этом основная часть кинетической энергии заключена в роторе двигателя и редукторе, т.е. в элементах кинематической схемы. При резких изменениях скорости движения ковша в забое и при стопорении запасенная кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию деформации элементов конструкции и канатов.

Таким образом, карьерному экскаватору присущи практически все характерные признаки, обосновывающие целесообразность применения частотно–регулируемого электропривода с системой прямого управления моментом для его главных механизмов. В качестве плюсов применения системы прямого управления моментом можно также выделить простоту настройки и исполнения при максимальном быстродействии и обеспечении приемлемой точности регулирования скорости и момента. Это обстоятельство обусловило выбор предлагаемой нами системы прямого управления моментом в качестве основной системы для управления электроприводами карьерного экскаватора.

Частые пуски, реверсы и торможения электроприводов главных экскаваторных механизмов требуют, чтобы в динамических режимах

двигатель развивал постоянный момент, близкий к максимальному значению. Это позволяет существенно повысить эффективность использования экскаватора за счет сокращения времени цикла экскавации. Поскольку для экскаваторного электропривода не предъявляется специальных требований к точности управления и жесткости рабочей части механических характеристик и поскольку использование вращающегося датчика скорости сопряжено со значительными трудностями, система прямого управления моментом может быть реализована в бездатчиковом варианте. Для реализации блока вычисления скорости могут применяться либо специальные периферийные устройства (так называемые эстиматоры скорости), либо периферийные устройства общего назначения (так называемые менеджеры событий). Для измерения электрических переменных микроконтроллер должен иметь встроенный АЦП с разрешением не ниже 10–12 двоичных разрядов и временем преобразования не хуже (5–10) мкс. Как правило, восьми каналов АЦП достаточно [28].

В качестве алгоритмов формирования питающего напряжения асинхронных двигателей мотор–колес самосвала могут также использоваться табличные релейно–импульсные алгоритмы прямого управления моментом. Работа электропривода мотор–колес самосвала имеет различные режимы работы, в основном это длительные режимы при максимальном моменте двигателя с неизбежными резкими изменениями ввиду наличия неровностей карьерных дорог. Поскольку система прямого управления моментом двигателя обладает высоким быстродействием и большей, по сравнению с аналогичными системами, перегрузочной способностью, она может быть рекомендована для управления главными частотно–управляемыми асинхронными электроприводами карьерных самосвалов. В системе мотор–колесо самосвала также затруднено использование датчика скорости и ввиду отсутствия высоких требований к точности регулирования частоты вращения вала двигателя система может быть реализована в бездатчиковом варианте.

Анализ широкого спектра типов полупроводниковой техники, на уровне изучения технической документации преобразователей частоты и систем управления ЭП переменного тока, а также практическая проверка на лабораторных макетах преобразователей частоты разных производителей, показал, что в большинстве из них реализуются режимы широтно–импульсной модуляции (ШИМ) [120, 116] и только в преобразователях частоты ABB [95] с DTC–управлением применяется частотно–широтно–импульсная модуляция (ЧШИМ), что позволяет достичь максимального быстродействия в контуре тока (момента). Как правило, несущая частота ШИМ лежит в диапазоне от 1,5 до 16 кГц. Примерно в этом же диапазоне изменяется частота ЧШИМ в преобразователях ACS 800, ACS 880.

На основании технических характеристик ряда электроприводов третьего поколения ACS 880–04, мощностью 400 кВт, компании ABB, FR-F 740-09620-EC, мощностью 400 кВт, компании Mitsubishi и Sinamics G 130, мощностью 400 кВт, компании Siemens приведен сравнительный анализ электроприводов с различными типами систем автоматического управления по быстродействию, динамический и статической точности и коэффициенту нелинейных искажений (Total Harmonic Distortion–THD). Результаты сопоставительного анализа сведены в таблице 2.5:

Таблица 2.5 – Сопоставление возможных систем управления ЭП

Способ организации автоматического управления	Управление U/f = const, без датчика скорости	САУ по алгоритму упрощенного векторного управления компании Mitsubishi серия FR-F 740-09620-EC	САУ по алгоритму векторного управления компании Siemens серия Sinamics G 130	САУ с разрывным управлением компании ABB серия ACS 880–04	
				DTC (с ДС)	DTC (без ДС)
Линейность, %	±12	±4	±4	±3	±4
Повторяемость, %	±4	±1	±1	±1	±1
Время реакции при номинальном моменте, мс	150	50	100-150	5-10	5-10

Продолжение таблицы 2.5

Статистическая точность, %	±(1-3)	+0,2% от максимальной выходной частоты	±0,01	±0,01	±(0,1-0,5)
Динамическая точность, %*с	3	0,4	0,3	0,1	0,4
Ударная Нагрузка, м/с	Н/Д	50	100-120	5-10	5-10
THD, %	Н/Д	Н/Д	≈ 3	8,5–9	8,5–9

В результате проведенного сопоставительного анализа с учетом всех требований, предъявляемых к электроприводам самосвалов и экскаваторов, можно сделать вывод, что принцип прямого управления моментом (DTC) обеспечивает высокое качество управления и может быть рекомендован для реализации системы автоматического управления электроприводом переменного тока транспортных машин и установок для тяжелых условий эксплуатации, в том числе для карьерных автосамосвалов и экскаваторов.

2.3 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭКСКАВАТОРА И САМОСВАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ

Для моделирования режимов работы электропривода в среде Simulink программы MatLab была взята известная [20] упрощенная компьютерная математическая модель (рисунок 2.9). В схеме питание осуществляется от источника постоянно тока, поскольку в данной работе не исследовалась часть системы до выпрямителя.

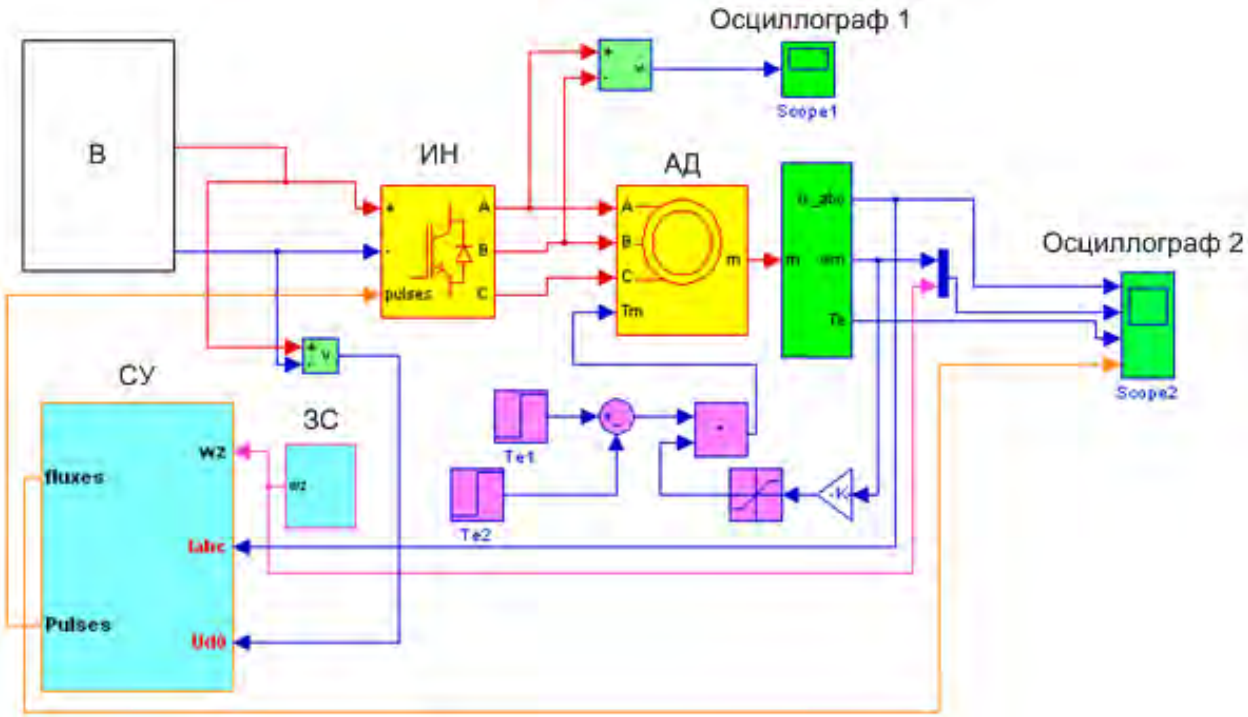

Рисунок 2.9 – Математичекая модель привода в среде Simulink программы MatLab

В – выпрямитель напряжения (активный выпрямитель, в случае с экскаватором или диодный многопульсный выпрямитель, в случае с самосвалом); *ИН* – инвертор напряжения; *АД* – асинхронный двигатель; *СУ* – система управления электроприводом

При математическом описании моделируемого двигателя были сделаны следующие допущения:

– отсутствуют потери в стали;

– обмотки фаз сдвинуты на 120°;

– постоянная величина воздушного зазора;

– реальная распределенная обмотка заменена эквивалентной сосредоточенной, создающей ту же магнитодвижущую силу;

– машина обладает симметричным ротором;

– магнитные поля и магнитодвижущие силы обмоток распределены вдоль окружности воздушного зазора по синусоидальному закону.

Математическая модель асинхронно электродвигателя описана классической системой дифференциальных уравнений пятого порядка:

$$U_{s1} = \frac{d\psi_{s1}}{dt} - \psi_{s2}\omega_k + R_s I_{s1} \quad (2.11)$$

$$U_{s2} = \frac{d\psi_{s2}}{dt} - \psi_{s1}\omega_k + R_s I_{s2} \quad (2.12)$$

$$0 = \frac{d\psi_{r1}}{dt} - (\omega_k - p\omega)\psi_{r2} + R_r I_{r1} \quad (2.13)$$

$$0 = \frac{d\psi_{r2}}{dt} - (\omega_k - p\omega)\psi_{r1} + R_r I_{r1} \quad (2.14)$$

$$M_d = \frac{mp}{2}\left|\dot{\psi}_s \times \dot{I}_s\right|, \quad (2.15)$$

Структура системы управления (рисунок 2.10) содержит регулятор скорости, блок вычисления координат и блоки реализации DTC.

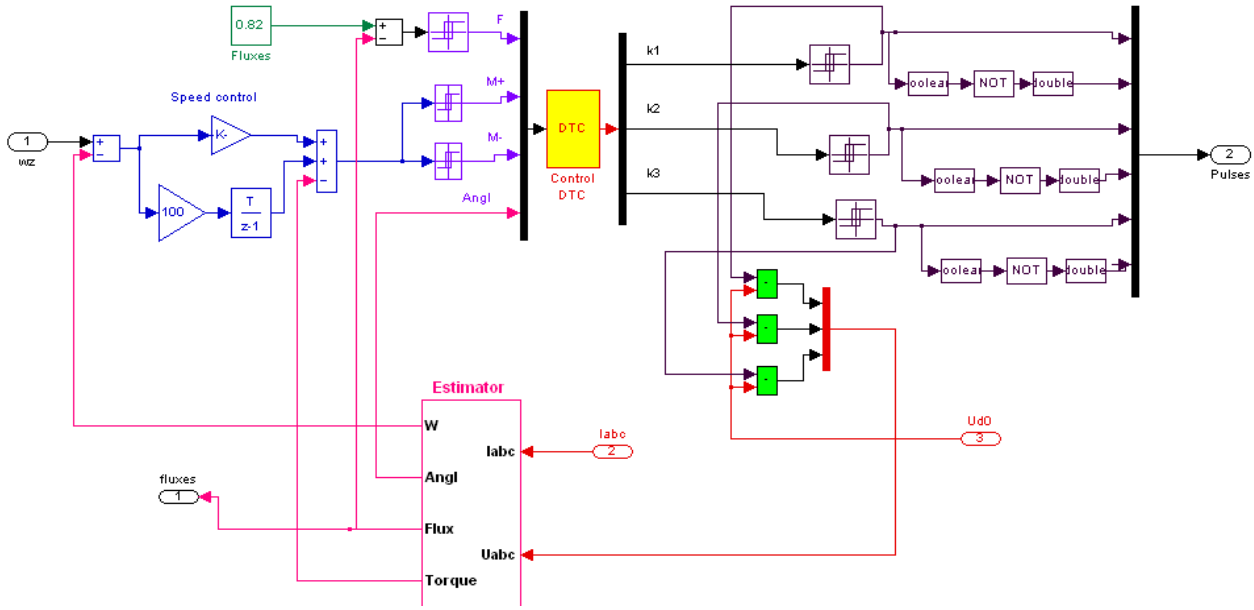

Рисунок 2.10 – Схема модели системы управления

Система управления содержит регулятор скорости, блок вычисления координат, блоки реализации DTC. Цифровой регулятор скорости ПИ-типа с параметрами Кп=2000, Ки=10000. Ширина петли гистерезиса регулятора потока составляет ±0,02. Ширина петли гистерезиса регулятора момента составляет ±30. В S-функции «DTC» на основании номера сектора и комбинации сигналов релейных регуляторов формируется адрес выбора вектора напряжения. По полученному адресу из массива извлекается число, соответствующее требуемому положению ключей. Текст программы S-функции приведен без стандартного интерфейса:

```
static int_T ast[6][6]={6,2,3,1,5,4, 0,7,0,7,0,7, 5,4,6,2,3,1, 2,3,1,5,4,6, 7,0,7,0,7,0, 1,5,4,6,2,3};
//таблица переключений
static real_T pi=3.141592653;
real_T R; int_T ic1, ivr1, ivu1, isk; //вычисление сектора угла
R=U(3); //угол
if (R<=pi/6&&R>-pi/6) ic1=0;
 if (R<=pi/2&&R>pi/6) ic1=1;
if (R<=5*pi/6&&R>pi/2) ic1=2;
if (R<=-5*pi/6||R>5*pi/6) ic1=3;
if (R<=-pi/2&&R>-5*pi/6) ic1=4;
if (R<=-pi/6&&R>-pi/2) ic1=5; //комбинации входных сигналов
 if(U(0)==1) ivu1=0;//поток
else ivu1=3;//поток
if(U(1)==1) ivr1=0;//момент
if(U(1)==0&&U(2)==0) ivr1=1;
if(U(2)==1) ivr1=2;
isk=ast[ivu1+ivr1][ic1];//выбор элемента таблицы
//включенный ключ
 y[0]=(isk & 0x0004)/4;
y[1]=(isk & 0x0002)/2;
y[2]=isk & 0x0001;
```

Рисунок 2.11 – Текст программы S-функции

Система управления включает в себя блок вычисления координат неполного порядка. Выявление координат производится по измеренным токам двигателя и выбранному вектору напряжения. В блоке вычисляются проекции на неподвижные оси вектора потокосцепления обмотки статора и его модуль, проекции на неподвижные оси вектора потокосцепления обмотки ротора, скорость вращения вектора потокосцепления ротора, скорость вращения вала двигателя, угловое положение вектора потокосцепления ротора, электромагнитный момент. В известных схемах DTC номер сектора определяется по угловому положению вектора потокосцепления статора без учета положения вектора потокосцепления ротора. Расположение этих векторов в разных секторах приводит к повышенным пульсациям момента. Результаты моделирования показали, что сектор лучше определять по вектору потокосцепления ротора [20].

Система управления с DTC обеспечивает быстродействующее, прямое управление вращающим моментом и поддержание потокосцепления статора на заданном уровне в асинхронных машинах. Система обязательно должна содержать блок вычисления координат привода. При этом непосредственно вычисляется пространственный вектор напряжения на основе рассогласований по моменту и потокосцеплению без применения настраиваемых регуляторов. Единственным настраиваемым регулятором является регулятор скорости. Настройка релейных регуляторов заключается в установке желаемой частоты переключения ключей инвертора [20].

Математическая модель настраивалась в первом случае – по данным двигателей хода экскаватора, во втором – двигателя мотор – колес самосвала приблизительно равной мощности (таблица 2.6) [29].

Таблица 2.6 – Основные технические данные двигателей хода экскаватора и мотор – колес самосвала

Типы двигателей	Мотор–колесо самосвала г/п 136 т (КТЭ–136)	В составе электропривода хода экскаватора	В составе электропривода подъема экскаватора
Мощность в режиме тяги (хода), кВт	2 х 500	2 х 400	2 х 850
Номинальный ток АД, А	550	392	831,2
Частота вращения АД номинальная, $мин^{-1}$ максимальная, $мин^{-1}$	1000 3400	992	992
Кратность максимального момента АД	2,8 (при длительном режиме)	2,88	2,24
Коэффициент мощности АД в номинальном режиме	0,84	0,84	0,84
КПД АД, %	93	95	95
Выпрямленное напряжение, В	950	735	735
Количество пар полюсов	3	3	3
$S_{ном}$	0,093	0,086	0,086
Активные сопротивления статора и ротора r_1/r_2	0,0063/0,0097	0,0049/0.0071	0,0078/0.0109
Индуктивные сопротивления статора и ротора x_1/x_2	0.0814/0.0785	0.0885/0.0830	0.0773/0.0514

По результатам исследований на математической модели были получены диаграммы работы электроприводов с асинхронным двигателем мотор–колеса самосвала и двигателями хода и подъема экскаватора в динамических режимах работы привода. Моделирование проводилось при условии максимальной нагрузки. Для самосвала это режимы работы с полной снаряженной массой (245,5 т) при начале движения на уклоне поверхности до 12%, режимы электрического торможения, стопорения и удержания самосвала под нагрузкой на уклоне.

Моделирование режимов работы электропривода подъема экскаватора

Пример цикловых диаграмм для реального экскаватора с объемом ковша 32 м^3 представлен на рисунке 2.12 [29]. Полный цикл копания брался от времени подхода ковша к забою (промежуток до 0,6 с. на циклограмме) до его выгрузки в кузов самосвала.

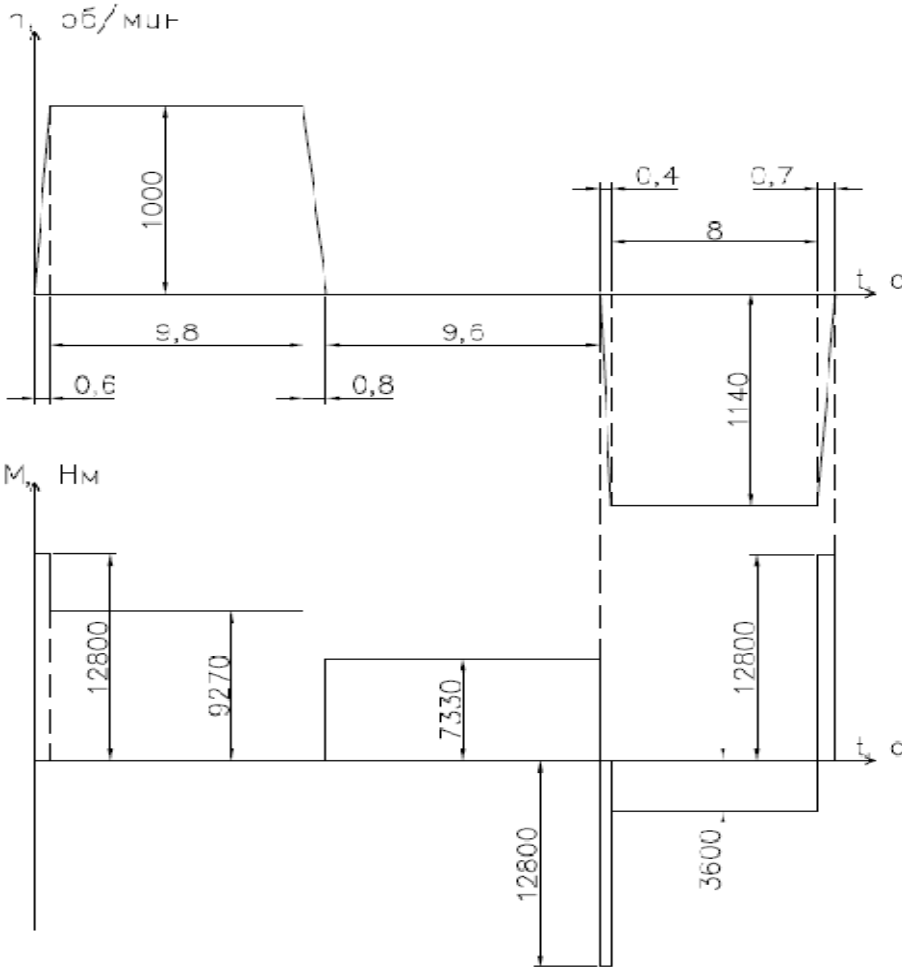

Рисунок 2.12 – Цикловые диаграммы привода подъема

На диаграмме, полученной при моделировании режимов работы привода подъема экскаватора (рисунок 2.13), видны броски электромагнитного момента двигателя как вниз, так и вверх от номинального, свидетельствующие о разности характера нагрузки.

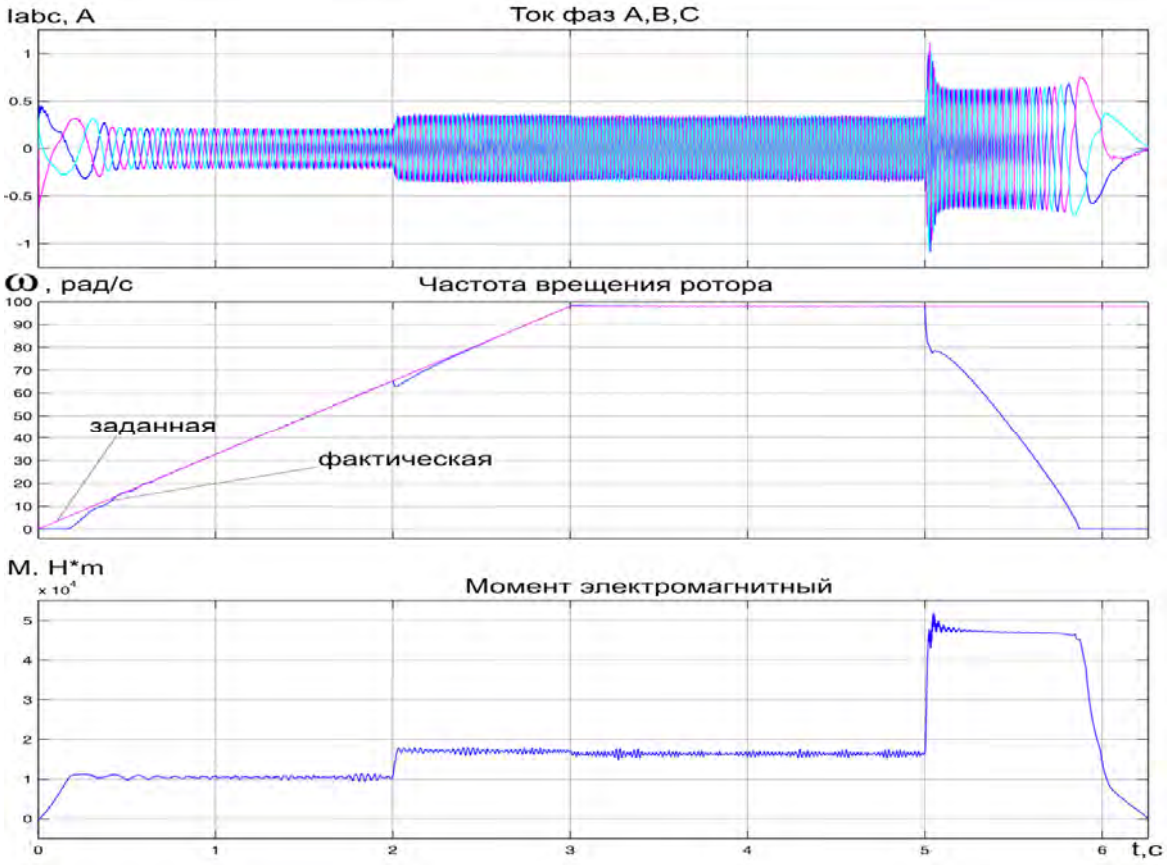

Рисунок 2.13 – Диаграммы работы электропривода подъема экскаватора, полученная в среде Simulink программы MatLab

Затем происходит резкий рост момента на валу ($M_{кр}$= 2,5*$M_{ном}$) вплоть до полного стопорения ковша экскаватора (период начиная с 5 с на диаграмме) с одновременным снижением задания скорости. Как видно на рисунке 2.14, реакция системы (промежуток времени от 5 – 5.05 с) на изменение момента на валу двигателя составляет 10–20 мс, что соответствует паспортным данным.

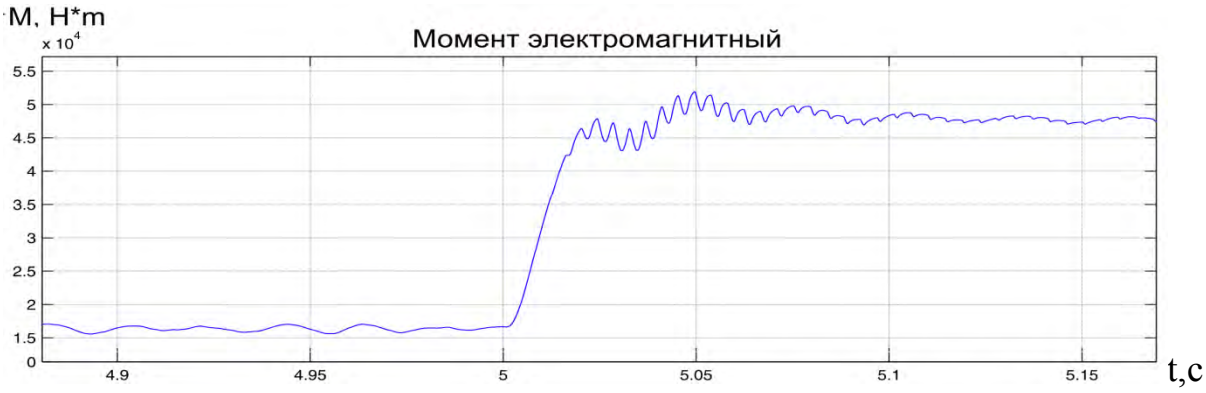

Рисунок 2.14 – Реакция системы управления на изменение момента на валу двигателя

Быстродействие системы при номинальной нагрузке соответствует заявленным значениям, а рассогласование между заданием по скорости и фактической скоростью составляет не более 5%, что свидетельствует о возможности применения релейно–импульсных алгоритмов управления с использованием законов прямого управления моментом асинхронного двигателя в составе систем управления электроприводом механизма подъема экскаватора.

Моделирование режимов работы электропривода хода экскаватора

Для электропривода хода экскаватора брался режим перемещения экскаватора при номинальной снаряженной массе в 1000 т. На рисунке 2.15 представлены диаграммы работы привода хода экскаватора в режиме, соответствующему перегрузке электродвигателей по моменту критическому кратному $M_{кр}=2*M_{ном}=6800$ H*m, при действующем значении тока $I_д=Im/\sqrt{2}=704,2$ А (на всех диаграммах показано амплитудное значение тока двигателя). Максимальная кратность тока для данного двигателя составляет $К_{iп}=2,88$. Такой режим соответствует подъему экскаватора под уклоном 12% (максимально возможному при проектировании дорог карьера). Как видно из представленной диаграммы, максимальная перегрузка присутствует в момент начала движения экскаватора, далее происходит снижение момента до значения $M_{кр}=1,8*M_{ном}$. После выхода на номинальную частоту вращения двигателя ω=98 рад/с, что соответствует максимальной линейной скорости движения экскаватора (0,88 км/ч), происходит снижение момента до значения $M=M_{ном}$ со снижением потребляемого тока. Затем момент снижается до значения $M=0,6*M_{ном}$, что соответствует выходу экскаватора на ровную поверхность со снижением потребляемого тока до значения $I_р=I_m/\sqrt{2}=306,7$ А. Начиная с момента времени *t=9 с* происходит торможение со значением электромагнитного момента близкого к нулю. Рассогласование заданных значений с фактическими находится в допустимых пределах (<5%); токи фаз, значения скорости и электромагнитного момента находятся в

допустимых пределах и соответствуют значениям реальных двигателей устанавливаемых на экскаваторах, что свидетельствует о возможности применения релейно–импульсных алгоритмов управления по законам прямого управления моментом для асинхронного электропривода хода экскаватора.

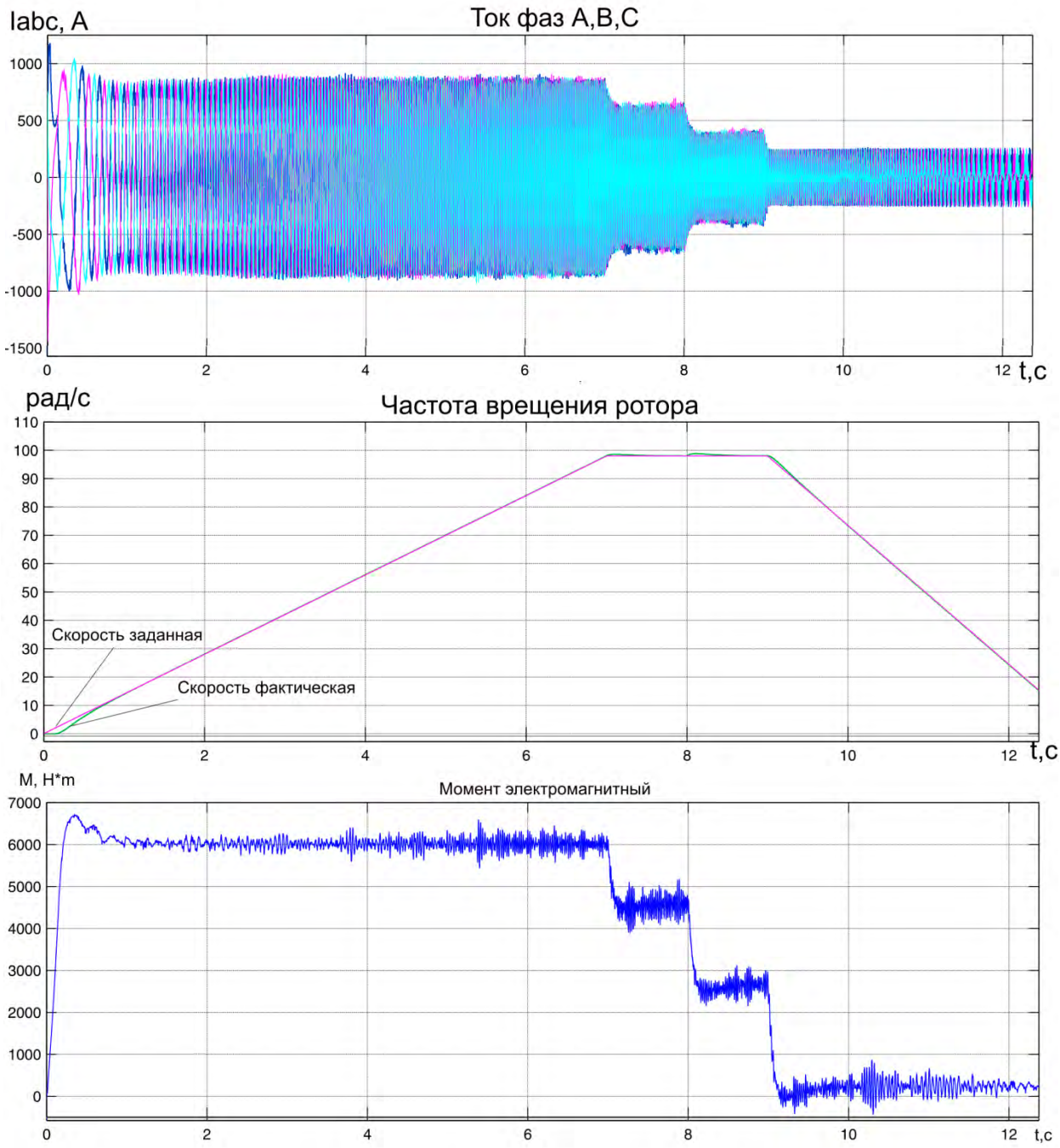

Рисунок 2.15 – Диаграммы токов фаз, частоты вращения ротора и электромагнитного момента ЭП хода экскаватора

Моделирование режимов работы электропривода мотор–колес самосвала

При моделировании режимов работы ЭП переменного тока карьерного самосвала БелАЗ 7513 грузоподъемностью 136 т брался режим подъема с перегрузкой тяговых двигателей ($M=2,5*M_{ном}$). Такой режим соответствует подъему самосвала при полной загрузке под уклоном 12% (максимально возможному при проектировании дорог карьера). Как видно из представленной диаграммы (рисунок 2.16), максимальная перегрузка ($M=2,5*M_{ном}= 7200$ H*m) возникает в момент начала движения, далее происходит снижение момента до значения $M=1,8*M_{ном}= 5200$ H*m.

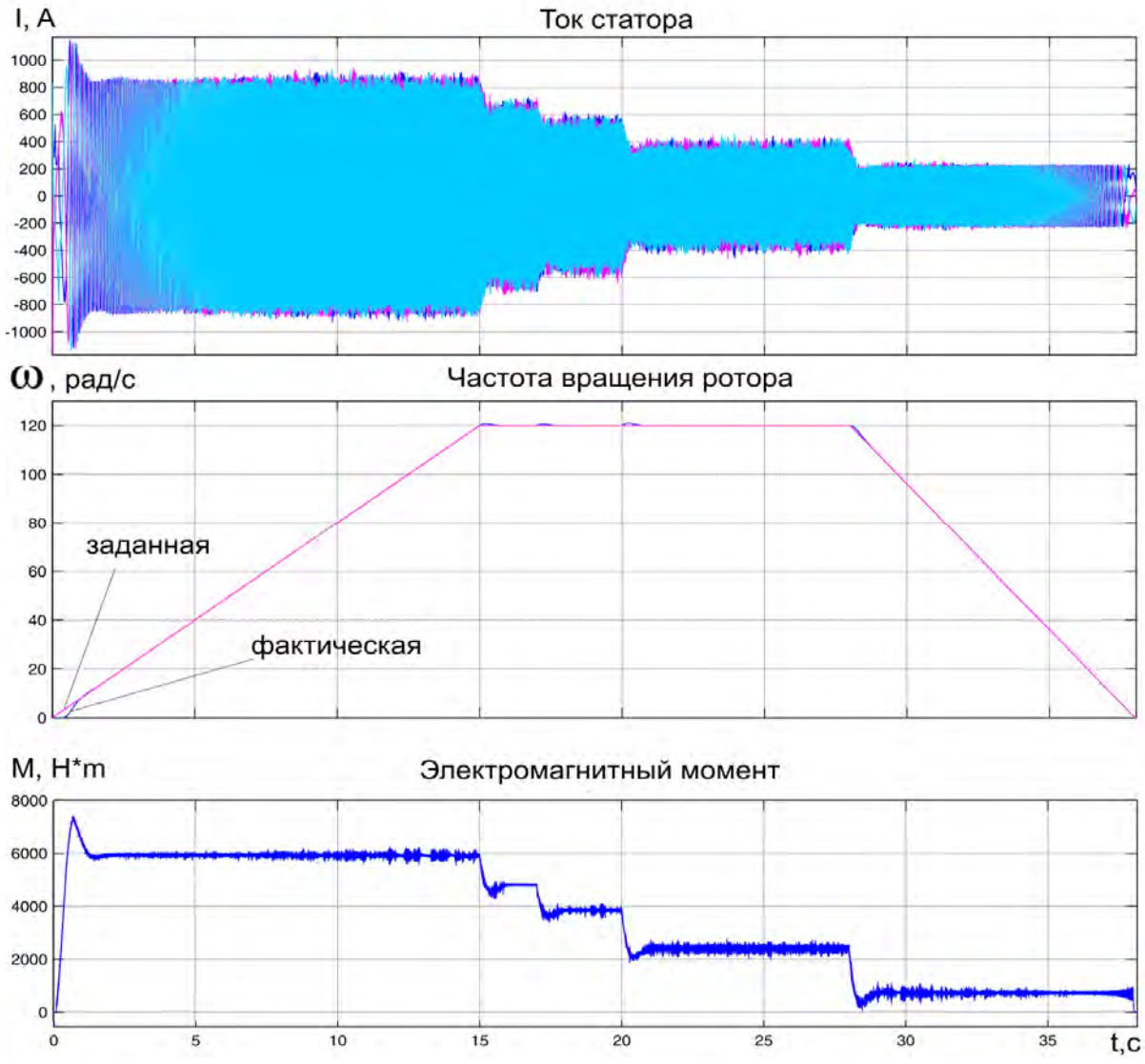

Рисунок 2.16 – Диаграммы токов фаз, частоты вращения ротора и электромагнитного момента ЭП мотор–колес самосвала

После выхода на номинальную частоту вращения двигателя ω=120 рад/с (рисунок 2.17), что соответствует линейной скорости движения самосвала 35 км/ч, происходит снижение момента сопротивления до значения $M=1,5*M_{ном}$= H*m, со снижением потребляемого тока до значения $I_{дейст}=Im/\sqrt{2}$= 496,5 А, после чего момент снижается до значения $M=1,1*M_{ном}$, что соответствует о выходе самосвала на более ровную поверхность со снижением потребляемого тока до значения $I_р=Im/\sqrt{2}$=306,7 А.

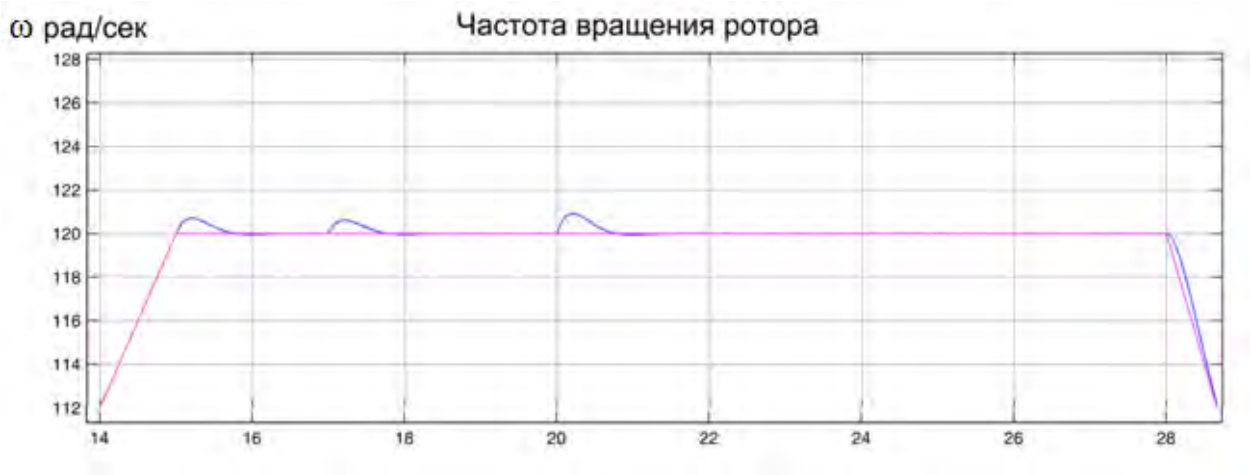

Рисунок 2.17 – Частота вращения вала двигателя мотор–колеса самосвала

Следующее изменение момента двигателя вниз от установившегося подразумевает выход самосвала на ровную поверхность с моментом на валу $M=0,5*M_{ном}$. Далее происходит плавное торможение со значением электромагнитного момента, близкого к нулю. Рассогласование заданных значений с фактическими находится в допустимых пределах (<5%); токи фаз, значения скорости и электромагнитного момента находятся в допустимых пределах и соответствуют значениям реальных двигателей, устанавливаемых на экскаваторах, что свидетельствует о возможности применения релейно–импульсных алгоритмов управления по законам прямого управления моментом для асинхронного электропривода хода экскаватора.

В результате проведенного сопоставительного анализа с учетом всех требований, предъявляемых к электроприводам самосвалов и экскаваторов, можно сделать вывод, что принцип прямого управления моментом (DTC)

обеспечивает высокое качество управления, более высокое быстродействие и ограничение (в среднем на 15%) перерегулирования момента асинхронного двигателя (по сравнению с алгоритмами векторного управления), а, следовательно, и ограничение динамических нагрузок на механизмы экскаватора и самосвала, что свидетельствует о возможности применения алгоритмов прямого управления моментом для главных электроприводов переменного тока карьерных экскаваторов и самосвалов.

Анализ результатов моделирования показывает преимущество систем, реализованных с применением алгоритма прямого управления моментом, перед системами с реализацией векторного управления в части ограничения перерегулирования момента двигателя (в среднем до 15 %), а, следовательно, и ограничения динамических нагрузок главных приводов экскаватора и самосвала.

2.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Для повышения производительности горно–транспортных комплексов целесообразен переход на использование бесконтактного асинхронного электропривода с преобразователем частоты ввиду простоты его обслуживания и обеспечения необходимых режимов работы главных приводов экскаватора и самосвала.

2. Применение релейно–импульсных алгоритмов управления при формировании напряжения питания двигателя обеспечивает более высокое, по сравнению с алгоритмами векторного управления, быстродействие, ограничивает перерегулирование момента и снижает, тем самым, динамические нагрузки.

3. Унифицированный подход в проектировании электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса возможен в части структуры и алгоритмов системы управления электроприводом переменного тока, что позволит снизить эксплуатационные затраты на обслуживание.

3 ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНО–ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА ЗА СЧЕТ ПЕРЕХОДА НА СИСТЕМУ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Существующая на горных предприятиях система планово–предупредительных ремонтов (ППР) нецелесообразна ввиду большого числа простоев оборудования, что не всегда оправданно и ведет к большим экономическим потерям. К тому же качество ППР не всегда производится на высоком уровне и остается риск наличия неучтенных неисправностей.

Все существующие минусы проведения ППР указывают на необходимость модернизации процесса обслуживания, а точнее на полную смену практики проведения ППР на обслуживание горно – транспортного комплекса по его фактическому состоянию с периодической диагностикой и фиксацией данных о развивающихся неполадках и определением остаточного ресурса оборудования, в частности электромеханической его части. Система обслуживания по фактическому состоянию представлена на рисунке 3.1.

Принцип обслуживания по фактическому состоянию основан на постоянстве контролирования диагностических параметров электромеханического оборудования и периодичности проведения дополнительных экспертных оценок развивающихся неисправностей. Ограниченный ряд параметров контролируется в автоматическом режиме системой диагностики, а остальные – при экспертной оценке повреждений в ручном, чем достигается целостность информации и повышается точность и скорость обработки данных.

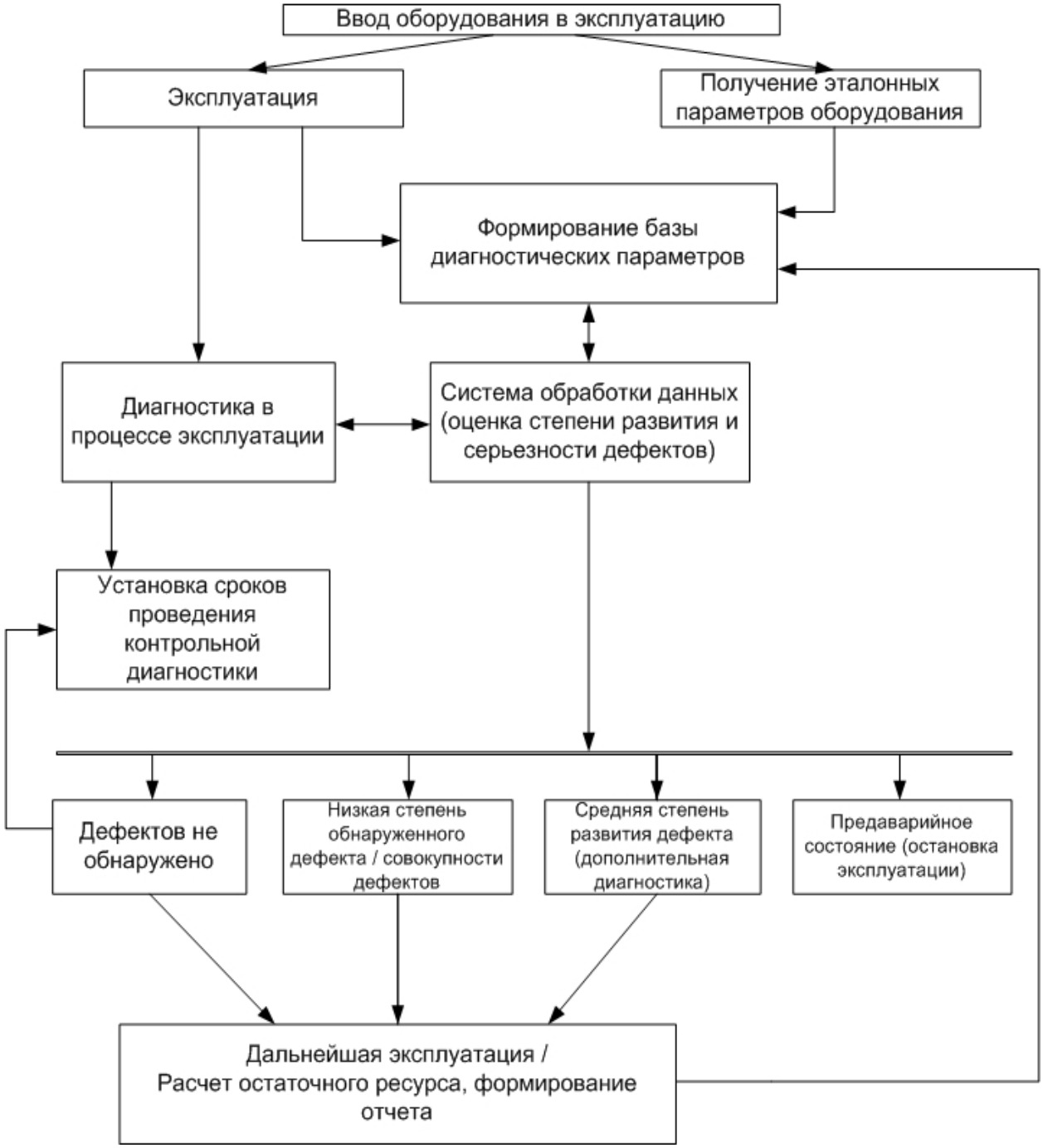

Рисунок 3.1 – Система обслуживания по фактическому состоянию

После ввода оборудования в эксплуатацию производится оценка его начальных параметров, которые записываются в базу данных и считаются эталонными. При последующей диагностике в процессе эксплуатации производится автоматический анализ полученных данных и их сопоставление с эталонными значениями. По результатам анализа производится оценка технического состояния электромеханического

оборудования и выводится отчет с рекомендациями к последующей эксплуатации или выводе из строя оборудования с целью проведения планового или капитального ремонта с одновременным пополнением базы данных неисправностей.

Проведение ремонтов по фактическому техническому состоянию будет способствовать оптимизации материально-технических затрат и уменьшению потерь, обусловленных простоями и необходимостью проведения внеплановых ремонтов.

3.1 СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА, ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГТК

Техническая диагностика – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [11].

Затраты на ремонт и техническое обслуживание электрооборудования экскаваторов и самосвалов составляют значительную часть общих эксплуатационных затрат предприятий добывающих и перерабатывающих полезные ископаемые. При этом их общая доля в процессе эксплуатации по мере выработки ресурса возрастает. Поэтому особую важность имеют вопросы, связанные с оценкой текущего состояния используемого электрооборудования, своевременной диагностикой аварийных и предаварийных режимов его работы, оценкой остаточного ресурса. Сложность технической диагностики обусловлена широкой номенклатурой используемого в технологических комплексах оборудования, спецификой его исполнения и многообразием режимов работы.

Целью диагностики электрооборудования ГТК является определение его технического состояния и оценка остаточного ресурса. Это повышает надежность электротехнических систем и при удовлетворительном техническом состоянии электрооборудования позволяет увеличить их ресурс. Повышение надежности достигается за счет раннего обнаружения дефектов и неисправностей, что позволяет устранить их во время технического обслуживания и исключить отказы во время работы. Повышение технического ресурса систем ответственного назначения обеспечивается за счет перехода к техническому обслуживанию по состоянию. В литературе [62] показано, что переход к техническому обслуживанию по состоянию принес выгоду, эквивалентную стоимости 30% общего парка горно–

транспортных машин. Следует отметить, что ресурс таких систем должен определяться по наиболее слабым экземплярам изделия и, соответственно, требует достаточного объема статистических данных по аналогичным системам.

В настоящее время для многих отраслей промышленности характерен переход от технического обслуживания по регламенту или по выходу из строя электрооборудования к обслуживанию по фактическому состоянию. Причем последнее обеспечивает значительное сокращение эксплуатационных затрат [62].

Однако для перехода к новым формам технического обслуживания горно–транспортного комплекса необходимо иметь системы технической диагностики, обеспечивающие адекватную оценку текущего состояния оборудования и прогноз его дальнейшего изменения.

Система технической диагностики должна включать в себя:

а) объект диагностирования - электрооборудование и связанные с ним устройства:

1) функциональное устройство;

2) отдельные составные части.

б) средства диагностирования:

1) первичные преобразователи диагностируемых параметров;

2) вторичные преобразователи и нормализаторы сигналов;

3) устройства сбора данных, в т.ч. удаленного;

4) специализированное программное обеспечение, выполняющее функции: сбора и обработки информации; создания базы данных реального времени для накопления статистки изменения технического состояния объектов диагностики; формирования отчетов, включающих оценку текущего технического состояния объектов диагностики и прогноз

остаточного ресурса (при условии достаточного объема статистических данных в базе данных):

в) исполнители:

1) операторы;

2)автоматические устройства;

г) средства связи с ЭВМ верхнего уровня;

д) техническая документация:

1) эксплуатационная;

2) ремонтная.

Основной задачей технической диагностики является распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации. Под распознаванием понимается отнесение состояния системы к одному из возможных классов (диагнозов) на основе анализа совокупности диагностических признаков *k*. Так как техническая диагностика связана с обработкой большого объема данных, то принятие решений целесообразно осуществлять с помощью экспертных систем на ЭВМ.

Состояние технической системы в процессе диагностических операций может быть представлено с помощью комплекса признаков:

$$K = (k_1 + k_2 \dots \dots k_j, \dots \dots k_v), \quad (3.1)$$

причем каждый конкретный экземпляр системы соответствует их некоторой реализации:

$$K^* = (k_1^* + k_2^* \dots \dots k_j^*, \dots \dots k_v^*) \quad (3.2)$$

Таким образом, общее состояние системы можно представить в виде вектора в v-мерном пространстве. Математической базой статистических методов технической диагностики является теория статистических решений

[62]. Среди методов технической диагностики особое место занимает метод, основанный на обобщенной формуле Байеса [62].

Основу метода составляет простая формула Байеса [62], согласно которой, если имеется диагноз D_i, и простой признак k_j, встречающийся в этом диагнозе, то вероятность их совместного появления:

$$P(D_i k_j) = P(D_i)P\left(\frac{k_j}{D_i}\right) = P(k_j)P(\frac{D_i}{k_j}) \tag{3.3}$$

Предполагается что система может находиться только в одном из указанных состояний, если это условие не выполняется, т.е. возможно существование нескольких состояний одновременно (например, наличие одновременно нескольких неисправностей), то необходимо вводить отдельные диагнозы для каждого сочетания диагнозов.

Для определения вероятности диагностики по методу Байеса необходимо на основе статических данных заполнить диагностическую матрицу, содержащую вероятности значений признаков при различных диагнозах:

$$D_i = \begin{bmatrix} P(\frac{K_{11}}{D_1}) & \cdots & P(\frac{K_{NM}}{D_1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(\frac{K_{11}}{D_i}) & \cdots & P(\frac{K_{11}}{D_i}) \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Процесс обучения диагностической системы по этому методу состоит в корректировке диагностической матрицы в процессе эксплуатации оборудования по результатам диагностических операций. Точность диагноза в значительной степени определяется объемом статистических данных по агрегатам данного типа и возрастает по мере их накопления. Одним из недостатков метода является возможность возникновения погрешности при распространении редко встречающихся диагнозов.

Часто имеется несколько вероятных диагнозов при данном комплексе диагностических признаков. В этом случае используется принцип максимального правдоподобия:

$$K^* \in D_i, если\ P\left(\frac{K^*}{D_i}\right) > P\left(\frac{K^*}{D_i}\right) \quad (3.5)$$

Согласно (3.5) устанавливается тот диагноз, вероятность данного комплекса диагностических признаков для которого наиболее высока. При принятии решений по результатам диагностики следует учесть, что как принятие ложного диагноза («ложная тревога»), так и непринятие правильного («пропуск дефекта») приводят к определенным последствиям. Поэтому оценку последствий принятия диагностических решений следует производить с использованием теории риска.

Помимо распространенного метода уделяется внимание следующим: методам статистического распознавания (метод последовательного анализа), методам статистических решений (метод минимального риска, метод минимального числа ошибочных решений, метод минимакса, метод Неймана–Пирсона, метод наибольшего правдоподобия), методам разделения в пространстве признаков, методам распознавания образов, методам теории информации и широко используемым интеллектуальным методам (нейросетевые методы, теории нечетких множеств, генетические алгоритмы).

Одну из основных частей технологического электрооборудования машин и механизмов составляет электропривод. В настоящее время широко применяются регулируемые приводы переменного тока мощностью от единиц Вт до нескольких МВт. Наиболее распространены регулируемые электроприводы на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Наибольшее развитие получили следующие методы диагностики технического состояния электрических машин:

а) методы, основанные на анализе вибраций отдельных элементов агрегата;

б) методы, основанные на анализе акустических колебаний, создаваемых работающей машиной [16, 62];

в) методы, основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя;

г) методы, основанные на анализе вторичных электромагнитных полей машины;

д) методы, основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов;

е) методы диагностики механических узлов (в частности подшипников), основанные на анализе содержания железа в масле [13,62];

ж) методы, основанные на анализе электрических параметров машины [22-25, 62].

В условиях предприятий использование многих указанных выше методов ограничено, так как не всегда возможен непосредственный доступ к диагностируемой электрической машине, а тем более установка на ней датчиков. Поэтому, с точки зрения практической реализации систем диагностики, преимущество имеют методы, основанные на анализе наблюдаемых электрических параметров, в частности тока, напряжения, потребляемой и отдаваемой мощности, измерение которых возможно и без непосредственного доступа к диагностируемому электрооборудованию, а также без установки первичных измерительных преобразователей в непосредственной близости от него. Эффективность указанных методов основана на том, что любые неисправности электрических машин и механизмов, сопряженных с ними, в конечном итоге приводят к возникновению электромагнитной несимметрии поля в зазоре машины, а, следовательно, к изменению спектрального состава токов и напряжений [24,

25, 62]. Аналогично и для других видов электрооборудования - изменения (неисправности) в нем приводят к изменениям электрических параметров.

Однако, методы, основанные на анализе спектрального состава токов и напряжений, также обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, магнитные и электрические цепи машины обладают инерционностью, т.е. работают как своего рода фильтры низкой частоты, и нелинейностью, что приводит к возникновению различных нелинейных искажений. Во-вторых, на спектральный состав токов и напряжений в значительной степени влияет спектральный состав и несимметрия напряжений питающей сети, а также переходные процессы, обусловленные в т.ч. и случайным характером загрузки агрегатов. Поэтому, непосредственная оценка состояния электромеханического оборудования только на основе контроля достижения фиксированных уровней отдельными составляющими спектров тока и напряжения в фиксированном диапазоне частот невозможна. Следовательно, актуальной научной и технической задачей является создание новых методов технической диагностики, учитывающих весь комплекс параметров наблюдаемых электрических сигналов и их спектров.

Кроме того, в случае, когда возможно использование и других методов диагностики, целесообразно использовать комплексные методы диагностики, включающие несколько различных методов, уточняющих и дополняющих друг друга.

3.2 ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ИХ ДИАГНОСТИКИ

Наиболее распространенными видами повреждений электрических машин являются следующие:

а) повреждения, вызывающие несимметрию электрических цепей ротора:

1) обрыв стержня ротора асинхронной машины с короткозамкнутым ротором;

2) межвитковые замыкания в обмотках роторов синхронных электродвигателей, асинхронных двигателей с фазным ротором и машин постоянного тока;

3) обрывы в обмотках роторов синхронных электродвигателей, асинхронных двигателей с фазным ротором и машин постоянного тока;

4) возникновение токов утечки в обмотках ротора в связи с ухудшением свойств изоляции;

б) повреждения, вызывающие несимметрию электрических цепей статора:

1) короткие замыкания в обмотках статора;

2) обрывы в обмотках статора;

3) возникновение токов утечки в обмотках статора в связи с ухудшением свойств изоляции;

в) повреждения, вызывающие несимметрию магнитных цепей:

1) эксцентриситет статора (неравномерный воздушный зазор) чаще всего является следствием некачественного монтажа подшипниковых опор, неплоскостности опорных поверхностей или тепловых деформаций в агрегате;

2) эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения;

3) осевое смещение ротора относительно статора;

4) ослабление прессовки пакета стали ротора/статора;

5) повреждения магнитопроводов ротора/статора.

Диагностика повреждений электрических машин по электрическим параметрам

В качестве критерия для оценки энергетических процессов в реальной машине, обладающей неравномерным полем в воздушном зазоре и, как следствие, имеющей полигармонический состав спектра токов и напряжений, используют понятие динамического коэффициента мощности [102], равного:

$$k_{\text{ЭП}} = \eta \cdot k_{\text{М}} \cdot k_{\text{И}}, \tag{3.6}$$

где

η – коэффициент полезного действия электрической машины;

$k_{\text{М}}$ – средний коэффициент мощности;

$k_{\text{И}}$ – коэффициент искажений.

Для полигармонического сигнала мощности многофазной машины КПД определяется как:

$$\eta = \frac{P_2}{\sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}, \tag{3.7}$$

где

P_2 – механическая мощность на валу двигателя, кВт;

m – число фаз двигателя;

P_{nk} – мощность n-ной гармоники k-й фазы двигателя, кВт;

$P_k(\omega)$ – составляющая мгновенной мощности, приходящаяся на частоту ω.

Средний коэффициент мощности определяется [33]:

$$k_{\text{М}} = \frac{\sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}{\sum_{k=1}^{m}\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2}\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}}, \qquad (3.8)$$

где

U_{nk} – напряжение n-ной гармоники k-й фазы двигателя, В;

I_{nk} – ток n-ной гармоники k-й фазы двигателя, А.

Коэффициент искажений характеризует отношение полезной мощности машины при реальном поле в зазоре к полезной мощности при синусоидальном поле в зазоре (для идеальной машины).

Учитывая, что при синусоидальном поле сигнал содержит только основную гармонику, для коэффициента искажений мощности можно записать:

$$k_{\text{И}} = \frac{P_{2\text{О}}}{P_{2\text{несин}}} = \frac{\eta_{\text{ном}} P_{2\text{ном}}}{\eta\sum_{k=1}^{m}\int_{0}^{\omega_{max}} P_k(\omega)d\omega}, \qquad (3.9)$$

где

$P_{2\text{О}}$ – мощность основной гармоники поля, Вт;

$P_{2\text{несин}}$ – суммарная мощность искажений, создаваемых высшими гармониками, включая основную, Вт;

$P_{2\text{ном}}$ – мощность на валу в номинальном режиме;

$\eta_{ном}$ – номинальный коэффициент полезного действия электрической машины.

Следует отметить, что понятие динамического коэффициента мощности характеризует общее состояние диагностируемого агрегата, т.к. позволяет оценить соотношение мощности спектра сигнала к полезной мощности и соответствующее им влияние искажений на энергетические показатели. Причем, наиболее важным с точки зрения диагностики является амплитудный, а не фазовый спектр [102] и, следовательно, можно условно

принять значения коэффициента мощности и коэффициента искажений постоянными.

Однако, выражения (3.6)-(3.9) не учитывают различную природу и информативность различных гармоник поля, а также нелинейный характер зависимости энергетических показателей и общего состояния агрегата от отдельных составляющих спектра. В связи с последним, этих показателей недостаточно для выполнения диагностических операций.

После определения КПД электрической машины и всего агрегата в целом следует определить, на каких частотах происходят потери энергии, что позволит выявить, какой вид неисправности приводит к повышению потерь. При этом необходимо разбить спектр мгновенной мощности на диапазоны так, чтобы отдельным диапазонам соответствовали характерные для данного вида неисправностей потери [116, 97].

Для каждого из диапазонов частот определяются:

– среднеквадратичное значение (СКЗ) мгновенной мощности в пределах диапазона

$$P_{\text{СКЗ}i} = \frac{1}{\Omega}\int_{\omega_i-\Delta\omega_i}^{\omega_i+\Delta\omega_i} P(\omega)d\omega\,, \tag{3.10}$$

$$\Omega = \int_{\omega_i-\Delta\omega_i}^{\omega_i+\Delta\omega_i} \omega d\omega\,. \tag{3.11}$$

– пик–фактор

$$P_{\text{ПИК}i} = \frac{\underset{\omega\in(\omega_i-\Delta\omega_i,\omega_i+\Delta\omega_i)}{max}\left[P(\omega)\right]}{\frac{1}{\Omega}\int_{\omega_i-\Delta\omega_i}^{\omega_i+\Delta\omega_i} P(\omega)d\omega}. \tag{3.12}$$

Величина потерь в данном частотном диапазоне характеризует величину повреждения, пик–фактор – вид повреждения. В ряде случаев, например для

диагностики механических неисправностей, целесообразно использовать совместно с диагностикой по электрическим параметрам и другие методы [51,56].

Наличие как электрических, так и механических по своей природе повреждений агрегата, как правило, приводит к нарушению электромагнитной симметрии. Её величина может быть охарактеризована коэффициентом несимметрии фазных токов (для двигателя) и как следствие фазных мощностей. При этом необходимо также учитывать возможные несимметрии питающих напряжений двигателя.

Необходимо контролировать: коэффициенты искажений электрических параметров, коэффициенты несимметрии обратной и нулевой последовательности, и другие параметры, характеризующие энергетические процессы в агрегате. Причем, указанные параметры необходимо определять не только для напряжений, но и для токов и мощностей. Для двигателя (при синусоидальном, симметричном моногармоническом питающем напряжении) основную информацию несут именно мгновенные значения токов, т.к. фазное напряжение в большей степени определяется питающей сетью (при мощности питающей сети много большей, чем мощность двигателя). Коэффициент гармоник характеризует гармонический состав напряжений (токов, мощностей) каждой из фаз.

Диагностика повреждений ротора методом анализа спектров потребляемых токов

Анализ повреждений ротора асинхронной машины с короткозамкнутой обмоткой представляет достаточно сложную задачу, до конца в настоящее время не решенную, однако имеется большое количество работ, предлагающих различные пути её решения.

Известны следующие способы определения повреждений ротора [30]:

а) Анализ спектров тока;

б) Анализ осевого магнитного потока двигателя;

г) Анализ момента двигателя [96,30];

д) Анализ потерь энергии;

е) Анализ годографа обобщенного вектора тока;

ж) Метод, основанный на влиянии на питающую сеть в области низких частот;

з) Методы вибрационного анализа.

При использовании методов спектрального анализа потребляемого тока для определения повреждений ротора анализируют следующие частные составляющие.

При исправном роторе в спектре тока имеют место гармоники следующих частот [30]:

- частота роторной МДС или тока в роторе

$$f_2 = sf_1 , \tag{3.13}$$

- частота вращения ротора в герцах

$$f_{\text{р}} = (1 - s) f_1 , \tag{3.14}$$

- частоты, обусловленные питающим напряжением.

При нарушении симметрии ротора в спектре возникают частоты, вызванные тем, что поток в воздушном зазоре, содержащий МДС, направленную в обратном направлении относительно основной, индуцирует частоту [30]

$$f_{\text{НСРI}} = f_1 - 2sf_1 , \tag{3.15}$$

Несимметрия ротора приводит также к вибрации фундамента агрегата, что можно обнаружить по возникновению в спектре вибрации, а также и в спектре токов составляющих с частотами [30]

$$f_{\text{НСР2}} = \left(1 \mp 2ks\right), \tag{3.16}$$

где

$k = 1,2,3,...$

и

$$f_{\text{НСР3}} = \left(n\left(1 - s\right) \pm s\right), \tag{3.17}$$

где

$n = 1,5,7,11,...$

Диагностика несимметрии воздушного зазора методом анализа спектров потребляемых токов

Выделяют три вида несимметрии воздушного зазора [110]:

а) Статический эксцентриситет ротора относительно статора, обусловленный несоосностью ротора и статора, что может быть вызвано как неправильным монтажом и дефектами изготовления деталей двигателя, так и повреждениями подшипниковых узлов, сердечников ротора или статора в процессе эксплуатации. При статическом эксцентриситете, при вращении ротора воздушный зазор остается неизменным.

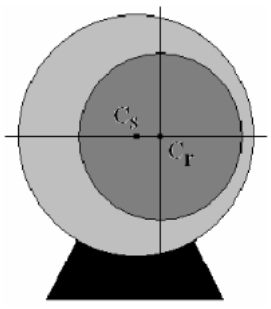

Рисунок 3.2 – Статический эксцентриситет ротора относительно статора

Статический эксцентриситет (рисунок 3.2) статора выявляют по наличию в спектре тока следующих частот [30]:

$$f_{\text{СЭ}} = \left(kz_2 \frac{(1-s)}{p} \pm n \right) f_1 \ , \tag{3.18}$$

где

z_2 – число стрежней обмотки ротора;

$k = 1,2,3,\ldots$, $n = 1,5,7,11,\ldots$.

б) Динамический эксцентриситет

Причины динамического эксцентриситета сходны с причинами статического эксцентриситета, однако, при вращении ротора величина воздушного зазора также изменяется в функции положения ротора.

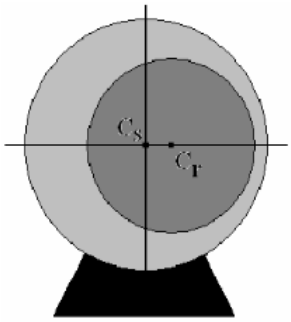

Рисунок 3.3 – Динамический эксцентриситет

Динамический эксцентриситет (рисунок 3.3) выявляют по наличию в спектре частот [30]:

$$f_{\text{ДЭ}} = \left[\left(kz_2 \pm n_{\text{Д}} \right) \frac{(1-s)}{p} \pm n \right] f_1 , \tag{3.19}$$

где

$k = 1,2,3,\ldots$, $n = 1,5,7,11,\ldots$, $n_{\text{Д}} = 1,2,3.$

в) Смешанный эксцентриситет

Смешанный эксцентриситет представляет собой сочетание статического и динамического эксцентриситета. В работе [30] предложена формула для частот, свидетельствующих о смешанном эксцентриситете:

$$f_{mix,\text{Э}} = \left[1 \pm k(1-s) \right] f_1 , \tag{3.20}$$

где

$k = 1,2,3,\ldots$.

Диагностика несимметрии статора методом анализа спектров потребляемых токов

Как видно из приведенной в работе [30] статистики, повреждения статора являются второй причиной повреждения асинхронных машин, после повреждений подшипников. Причем главной причиной повреждений статора является повреждение его обмоток, чаще всего вследствие возникновения короткозамкнутых витков (пробой межвитковой изоляции).

В отличие от повреждений, вызванных пробоем межфазной изоляции или изоляции между фазой и корпусом, которые достаточно просто выявляются по наличию токов нулевой последовательности и токов утечки, соответственно, а также в процессе периодического измерения сопротивления изоляции, межвитковые замыкания на начальном этапе себя практически не проявляют. Однако наличие короткозамкнутых витков обуславливает повышенный нагрев соответствующих частей обмотки, что со временем приводит к выходу её из строя, причем процесс развития неисправности происходит достаточно быстро. Данное повреждение приводит к увеличению потерь в двигателе, особенно в режиме холостого хода, однако только по величине потерь определить их причину затруднительно.

В работе [30] предлагается выявлять наличие короткозамкнутых витков статора по наличию в спектре тока частот

$$f_{\text{НСС1}} = f_1 \left| \frac{n}{p}(1-s) \pm k \right|, \qquad (3.21)$$

Метод ваттметрографии

Суть метода заключается в том, что в основе применения электрооборудования и сопряженных с ним устройств лежит преобразование электрической энергии. При этом часть энергии теряется в электрооборудовании и сопряженных с ним устройствах, т.е. составляет потери. Любые повреждения, так или иначе, приводят к увеличению потерь и снижению КПД. Для технически исправного электрооборудования известна зависимость потерь от нагрузки (КПД) и при возникновении неисправности эта зависимость изменяется. Под ваттметрограммой понимается зависимость огибающей среднеквадратичных значений мгновенной мощности (электрической или механической) от времени. Имея ваттметрограммы для диагностируемого электрооборудования за время смены при нормальном режиме его работы, можно оценить потери в нем, что является косвенным показателем его технического состояния. Снимая ваттметрограммы через определенный период, можно определить, как меняется техническое состояние электрооборудования, а также его составляющих элементов, во времени. При наличии достаточного объема статистических данных возможно предсказать динамику этих изменений в дальнейшем, т.е. оценить остаточный ресурс. Более подробную информацию о причинах возникновения потерь несут ваттметрограммы, построенные для отдельных частотных составляющих мощности.

Метод ваттметрографии предусматривает регистрацию и накопление показателей электрических величин (токов, напряжения и мощности) контролируемого объекта и создание набора эталонных значений, соответствующих ресурсу испытуемого оборудования.

В дальнейшем разрабатывается алгоритм и программы диагностики и оценки остаточного ресурса по сравнению действительных и контрольных показателей.

3.3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВАТТМЕТРОГРАФИИ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГТК

Методология оценки остаточного ресурса с помощью метода ваттметрографии с использованием графиков потребляемой мощности

В качестве параметров, характеризующих общее состояние преобразователя может быть использована усредненная величина потерь электрической энергии [30]. Энергетические процессы в электроприводах горных машин могут быть проиллюстрированы структурной схемой, представленной на рисунке 3.4. Схема включает в себя:

- преобразователь электрической энергии (ЭП), например, преобразователь частоты;
- электромеханический преобразователь (ЭМП), например, асинхронный электродвигатель;
- механический преобразователь энергии (МП), например, понижающий редуктор.

Система получает от промышленной сети электрическую энергию мощностью P_0, кВт, ЭП преобразует параметры электрической энергии, выдавая на выходе энергию с мощностью P_1, в процессе преобразования часть энергии теряется в виде потерь $\Delta P_1 = P_0 - P_1$. На вход ЭМП поступает энергия P_1, часть которой $\Delta P_2 = P_1 - P_2$ теряется в процессе преобразования. Для МП, соответственно, на вход поступает P_2, в процессе преобразования теряется $\Delta P_3 = P_2 - P_3$, на выходе имеем P_3.

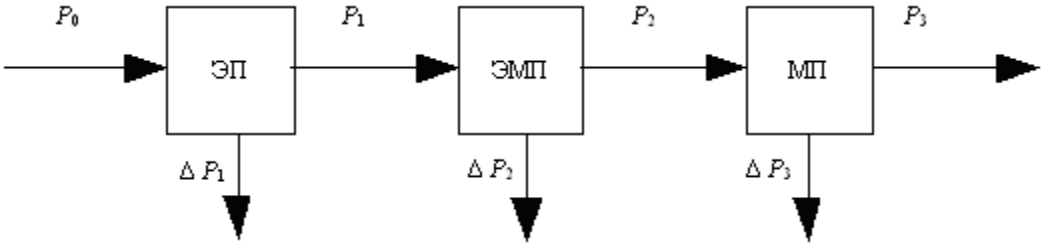

Рисунок 3.5 – Структурная схема преобразования энергии в приводе

В статическом режиме коэффициент преобразования каждого из блоков схемы характеризуется постоянным коэффициентом передачи - коэффициентом полезного действия [30]. Соответственно, для мощности на выходе преобразователя справедливо выражение

$$P_{i+1} = \eta_i \cdot P_i, \tag{3.21}$$

где

P_{i+1} - мощность на выходе преобразователя, Вт;

P_i - мощность на входе блока, кВт;

η_i - коэффициент полезного действия преобразователя, равный:

$$\eta_i = \frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{P_i - \Delta P_i}{P_i} = 1 - \frac{\Delta P_i}{P_i}, \tag{3.22}$$

где

ΔP_i - величина потерь в преобразователе, кВт.

Следует отметить, что слагаемое $\frac{\Delta P_i}{P_i}$ по сути представляет собой величину потерь в преобразователе, отнесенную к потребляемой мощности преобразователя. Введем для неё обозначение:

$$\rho_i = \frac{\Delta P_i}{P_i} \tag{3.23}$$

При различной нагрузке преобразователя, то есть при различной величине отдаваемой мощности P_{i+1} коэффициент полезного действия различен. Зависимость $\eta_i = \eta_i(P_{i+1})$ обычно приводится в технических данных

соответствующего преобразователя, либо может быть получена экспериментально для технически исправного преобразователя. Следует учесть, что эта зависимость, как правило, нелинейна [30]. Если эта зависимость известна, то можно определить зависимость величины ρ_i от потребляемой мощности P_i, также в общем случае нелинейную:

$$\rho_i = 1 - \eta_i(P_i) = \rho_i(P_i) \tag{3.24}$$

Привод содержит три преобразователя, включенных последовательно, следовательно, можно записать:

$$P_3 = \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot P_0 ,$$

или, с учетом сказанного,

$$P_3 = [1 - \rho_1(P_1)] \cdot [1 - \rho_2(P_2)] \cdot [1 - \rho_3(P_3)] \cdot P_0 \tag{3.25}$$

В процессе эксплуатации электропривода в преобразователях накапливаются повреждения, что приводит к ухудшению их энергетических характеристик, то есть при той же отдаваемой мощности потребляемая мощность увеличивается, причем при различных видах повреждений дополнительная составляющая потерь будет по-разному зависеть от отдаваемой мощности. Обозначим дополнительные потери в преобразователе $\xi_i(P_i)$, тогда

$$P_3 = [1 - \rho_1(P_1) - \xi_i(P_i)] \cdot [1 - \rho_2(P_2) - \xi_i(P_i)] \cdot [1 - \rho_3(P_3) - \xi_i(P_i)] \cdot P_0 \tag{3.26}$$

Потери в каждом из преобразователей в функции потребляемой мощности могут быть определены для технически исправного агрегата и для агрегата в его текущем состоянии. Сравнение указанных зависимостей позволяют оценить величину дополнительных потерь, обусловленных развитием повреждений, что и используется в качестве оценки технического состояния привода.

Указанный подход получил широкое распространение в области диагностики электроприводов проходческих и добычных комплексов [30], в

частности, известны зависимости потерь энергии в приводе от мощности при статической и динамической нагрузке, представленные на рисунке 3.5.

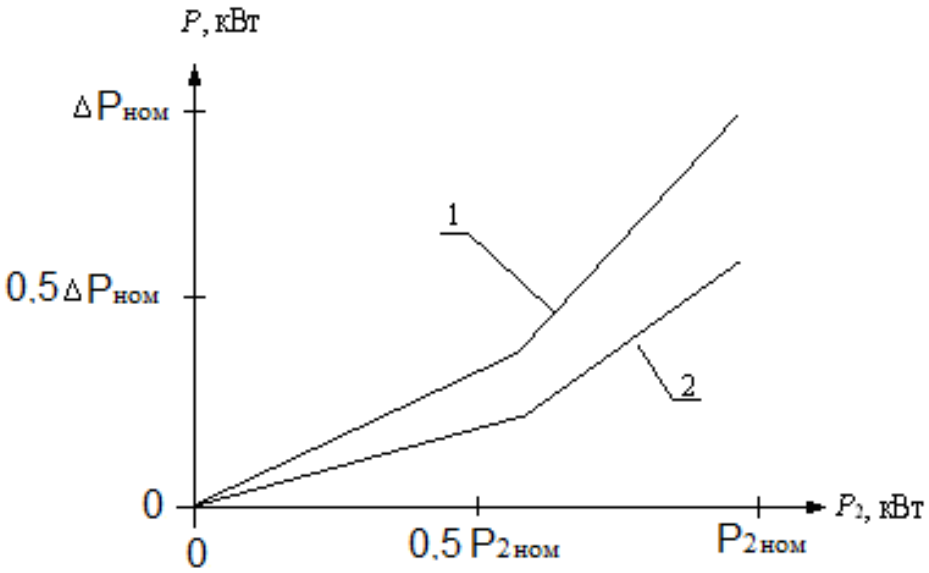

Рисунок 3.6 – Зависимость потерь в приводе горной машины от нагрузки
1 – при динамической нагрузке, 2- при статической нагрузке.

По мере выработки приводом ресурса, величина потерь мощности в приводе при той же нагрузке увеличивается. При этом коэффициент изменения потерь, равный разнице относительных потребляемых приводом мощностей при данной величине нагрузки, может служить показателем его технического состояния

$$\Delta\rho(P_2) = \frac{(P_{1\text{тек}} - P_{1\text{нач}})}{P_{1\text{нач}}}, \quad \text{кВт}, \tag{3.27}$$

где

$P_{1\text{нач}}$ - начальное значение потребляемой мощности привода при нагрузке P_2, измеренное на технически исправном двигателе в начальный период его эксплуатации, кВт;

$P_{1\text{тек}}$ - текущее значение потребляемой мощности двигателя при нагрузке P_2, измеренное в процессе его эксплуатации, кВт.

Для приводов горно-транспортных машин величина нагрузки двигателя P_2 является случайной функцией времени. В [30] показано, что с достаточной для инженерных расчетов точностью нагрузка горно-транспортных машин может быть представлена стационарным процессом, имеющим нормальное распределение.

Предлагается следующий метод определения потерь энергии в электроприводе горных машин. В начале эксплуатации, на заведомо исправном двигателе, в течение смены производится N измерений потребляемой мощности электропривода P_{1i} в интервале времени

$$\Delta t_i = \frac{T_{\text{см}}}{N}, \tag{3.28}$$

где

$T_{\text{см}}$ - время смены, ч;

N – число измерений.

Следует отметить, что чем меньше интервал времени Δt_i, тем выше достоверность измерений.

Далее определяют среднее значение потребляемой мощности электропривода $\overline{P_1}$, кВт, и производят оценку его стандартного отклонения $S_{\overline{P_1}}$ согласно формулам:

$$\overline{P_1} = \sum_{i=1}^{N} \frac{P_{1i}}{N}, \tag{3.29}$$

$$S_{\overline{P_1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{\left(\overline{P_1} - P_{1i}\right)^2}{N-1}}, \tag{3.30}$$

$$P_1 \in \left(P_{1\max}, P_{1\min}\right), \tag{3.31}$$

где

$$P_{1\min} = \overline{P_1} - 3 \cdot S_{\overline{P_i}}, \tag{3.32}$$

$$P_{1\max} = \overline{P_1} + 3 \cdot S_{\overline{P_i}} \tag{3.33}$$

Далее, через интервалы времени $T_{\text{диаг}}$,ч, величина которых должна определяться на основе статистических данных по отказам приводов, производится измерение потребляемой мощности и определяются среднее $\overline{P_1}'$, кВт, минимальное $P'_{1\min}$, кВт, максимальное $P'_{1\max}$, кВт, значения потребляемой мощности в течение смены. Далее определяется средняя величина коэффициента изменения потерь:

$$\Delta\rho_{\text{ср}} = \frac{\overline{P_1}' - \overline{P_1}}{P_{1\text{ном}}}, \tag{3.34}$$

где

$P_{1\text{ном}}$ – номинальное значение механической мощности электропривода, кВт.

Затем определяются величина коэффициента изменения потерь при минимальной и максимальной нагрузке:

$$\Delta\rho_{\min} = \frac{P'_{1\min} - P_{1\min}}{P_{1\text{ном}}}, \tag{3.35}$$

$$\Delta\rho_{\max} = \frac{P'_{1\max} - P_{1\max}}{P_{2\text{ном}}} \tag{3.36}$$

Результаты расчетов потерь по формулам (3.34)-(3.36) характеризуют техническое состояние привода. При выходе этих значений за допустимые пределы, величины которых должны определяться на основе статистических данных по отказам электроприводов данного типа, следует сделать вывод о вероятном наличии неисправности.

При наличии в спектре потребляемого тока определенных гармонических составляющих с частотами ω_i, соответствующих отдельным повреждениям, в спектре потребляемой мощности также будет содержаться

множество частотных составляющих с частотами, превышающими значения соответствующих диагностических частот в спектре тока $2\omega_i$. Выявление конкретных неисправностей осуществляется по величине потерь, приходящихся на данную частоту в спектре мощности

$$\Delta\rho(\omega_i) = \frac{\overline{P_1'(2\omega_i)} - \overline{P_1(2\omega_i)}}{P_{1\text{нач}}} \tag{3.37}$$

Технический ресурс $T_\text{р}$ обычно выражается в единицах времени и характеризует тот интервал времени, в течение которого с заданной вероятностью диагностируемый объект не переходит в предельное состояние. Следует учесть, что причинами отказа тех или иных узлов электропривода являются потери энергии в них, в частности, срок службы изоляции обмоток электрической машины определяется её нагревом и пропорционален квадрату потребляемого тока и, соответственно, потерям потребляемой мощности.

Вводится понятие энергоресурса A, равного приведенной величине потерь в агрегате за время до перехода его в предельное состояние

$$A = \rho T_\text{р} \tag{3.38}$$

Номинальный энергоресурс можно определить как

$$A_\text{ном} = \rho_\text{ном} T_\text{р.ном} \tag{3.39}$$

Для учета потерь энергии при перегрузках выше номинальных предлагается ввести коэффициент перегрузок $k_\text{пер}$, характеризующий приращение потерь в приводе при перегрузке и определяемый эксплуатационными характеристиками данного привода.

Таким образом, производя мониторинг потребляемой мощности через определенные интервалы времени, можно оценить величину отработанного энергоресурса из выражения

$$J_{\text{О}}=\sum_{i=1}^{N} k_{\text{пер}i}\cdot \rho_i \Delta t_i \,, \tag{3.40}$$

где

$k_{\text{пер}i}$ - коэффициент перегрузки при i-том замере;

ρ_i - приведенные потери при i-том замере, определяемые по эксплуатационным характеристикам;

Δt_i - длительность интервала времени между замерами, в течение которого нагрузка принимается неизменной, ч.

Пользуясь понятием ресурса, согласно формуле (3.40), можно определить ожидаемый остаточный ресурс:

$$T_{\text{р.ост}}=\left(1-\frac{J_{\text{О}}}{J_{\text{ном}}}\right)T_{\text{р.ном}} \tag{3.41}$$

При полигармоническом составе потребляемой мощности можно записать следующее:

$$\rho_i=\sum_{k=1}^{M}\rho_{ik}(\omega_k)\,, \tag{3.42}$$

где

$\rho_{ik}(\omega_k)$ - k-ая гармоническая составляющая в спектре потерь;

M - число анализируемых гармоник спектра.

Предлагается в выражении учесть тот факт, что отдельные составляющие спектра имеют большее влияние на энергоресурс, введением весовых коэффициентов:

$$\rho_i = \sum_{k=1}^{M} k_{\text{в}k}\rho_{ik}(\omega_k)\,, \tag{3.43}$$

где

$k_{\text{в}k}$ – весовые коэффициенты, учитывающие значимость k-й гармоники спектра.

С учетом сказанного, для отработанного энергоресурса выражение (2.64) принимает вид:

$$J_{\text{О}}=\sum_{i=1}^{N} k_{\text{пер}i}\left[\sum_{k=1}^{M} k_{\text{в}k}\ \rho(\omega_k)\right]\Delta t_i \qquad (3.44)$$

Подставляя выражение (3.43) в (3.44), получаем для остаточного ресурса:

$$T_{\text{р.ост}}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{N} k_{\text{пер}i}\left[\sum_{k=1}^{M} k_{\text{в}k}\rho(\omega_k)\right]\Delta t_i}{J_{\text{ном}}}\right)T_{\text{р.ном}} \qquad (3.45)$$

Методология оценки остаточного ресурса по совокупности применения метода ваттметрографии и частотного анализа спектров напряжения потребляемого тока

Для диагностики электромеханической части должны применяться методы, основанные на анализе спектрального состава тока и напряжения, поскольку они дают высокую точность определения повреждений электрической машины и привода в целом. Результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований показывают, что в электродвигателях при возникновении и развитии повреждений, отдельных элементов электрической и механической части оборудования, выявляется определенный спектр высших гармонических составляющих токов и напряжений. Выявление корреляционной связи между режимами работы, характерными повреждениями элементов электрической и механической части оборудования и параметрами генерируемых электродвигателем высших гармонических составляющих токов и напряжений позволяет решить задачу мониторинга технического состояния и прогнозирования ресурса этого оборудования. Преимуществом данного метода является возможность

проводить диагностику без непосредственного доступа к оборудованию, поскольку измерительные датчики подключаются к щиту управления. Комплексная система диагностики базируется на нескольких взаимодополняющих методах, которые дают возможность определить наибольшее количество самых опасных для данного оборудования дефектов. Оценка технического состояния оборудования должна производиться на основе многофакторного анализа: зависимостей напряжения и тока от времени, потребляемых электродвигателем; мгновенных мощностей каждой фазы; спектрального анализа полученных сигналов напряжения, тока и мощности; коэффициентов несимметрии (тока, напряжений, мощности); коэффициентов гармоник (тока и мощности); отдаваемой мощности электропривода; задания выходной координаты; величины потерь электрической энергии. На языке графического программирования осуществляют фильтрацию полученных сигналов тока и напряжения на низких и высоких частотах, производят вычисление мгновенных мощностей каждой фазы, производят спектральный анализ полученных сигналов напряжения, тока и мощности, рассчитывают коэффициенты несимметрии (тока, напряжений, мощности) и коэффициенты гармоник (тока и мощности), на основе известной величины отдаваемой мощности электропривода, с учетом текущего задания выходной координаты, вычисляют величины потерь электрической энергии, определяется техническое состояние электропривода и оценивают остаточный ресурс путем сравнения с эталонными сигналами, полученными на заведомо исправном агрегате.

Возможность получения технического результата основана на том, что любые неисправности электрических машин и механизмов, сопряженных с ними, в конечном итоге приводят к возникновению электромагнитной несимметрии поля в зазоре машины, а, следовательно, к изменению спектрального состава токов и напряжений. Также в качестве критерия для оценки энергетических процессов в реальной машине, обладающей неравномерным полем в воздушном зазоре и, как следствие, имеющей

полигармонический состав спектра токов и напряжений, используют сравнение величины потерь мощности на характерных для определенных повреждений частотах.

Преобразуют полученный сигнал из аналоговой в цифровую форму с помощью аналогово-цифрового преобразователя АЦП, выделяют анализируемые частоты с помощью программного фильтра низких частот на ЭВМ. Также производят анализ качества питающего напряжения в части наличия несимметрии, импульсов перенапряжения и высших гармонических составляющих с целью выявления причин преждевременного выхода из строя оборудования, обусловленных качеством питающего электропривод напряжения. Измерения и анализ производят с определенной периодичностью и создают базу данных измерений и результатов их анализа. В результате сравнения измеренных значений с эталонными и критическими производят контроль развития повреждений и определяют остаточный ресурс электропривода.

Влияние на работоспособность следует оценивать по четырем уровням состояния – отличное, хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное. Результаты обследования заносятся в базу данных, которая предназначена для ввода, хранения, отображения, сортировки и обработки диагностических параметров технологического оборудования. Также база данных обеспечивает возможность анализа данных, осуществление поиска и выборку по различным параметрам, формирование журнала регистрации контроля, вычисление остаточного ресурса оборудования на основе результатов анализа.

Величину остаточного ресурса определяют по формуле:

$$\begin{aligned}\delta = {} & k_1 K_{I_A}^2 + k_2 K_{I_B}^2 + k_3 K_{I_C}^2 + k_4 K_{\text{эп}}^2 + k_5 K_{\text{гI}}^2 + k_6 K_{\text{гP}}^2 \\ & + k_7 K_{P_A}^2 + k_8 K_{P_B}^2 + k_9 K_{P_C}^2 + k_{10} K_{\text{несим}U}^2 + k_{11} K_{\text{несим}I}^2 + \\ & + k_{12} K_{\text{несим}P}^2 + k_{13} K_{\Delta P}^2 + k_{14} K_{U_A}^2 + k_{15} K_{U_B}^2 + k_{16} K_{U_C}^2\end{aligned}, \qquad (3.46)$$

где

K_{I_A}, K_{I_B}, K_{I_C} - коэффициенты расхождения амплитуд сигналов тока на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети для фаз *A*, *B*, *C,* соответственно; K_{U_A}, K_{U_B}, K_{U_C} - коэффициенты расхождения амплитуд сигналов напряжения на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети для фаз *A*, *B*, *C,* соответственно;

$K_{\text{эп}}$ - динамический коэффициент мощности;

$K_{\text{г}}$ - коэффициент гармонических колебаний (тока и мощности);

$K_{P_A}, K_{P_B}, K_{P_C}$ - коэффициенты расхождения амплитуд сигналов мощности на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети для фаз *A*, *B*, *C*, соответственно;

$K_{\text{несим}\,U}$ - коэффициент несимметрии напряжения;

$K_{\text{несим}\,I}$ - коэффициент несимметрии тока;

$K_{\text{несим}\,P}$ - коэффициент несимметрии мощности;

$K_{\Delta P}$ - коэффициент потери мощности.

По результатам анализа комплекса диагностических параметров определяется техническое состояние ЭМО горно–транспортного комплекса и оценивается остаточный ресурс. Получившееся значение остаточного ресурса сравнивают с предельным значением $\delta_{пр}$, определяемым для каждого агрегата на основе статистических баз данных, но необходимо выполнения условия $\delta \le \delta_{пр}$. В случае невыполнения данного условия агрегат выводится из работы. Регулярный мониторинг электропривода позволяет выявлять неисправности на ранней стадии возникновения, отслеживать динамику их развития, определять остаточный ресурс и планировать рациональные сроки проведения ремонтов.

На данный способ определения остаточного ресурса подана заявка на патент № 2013135607 (вх. № 053400 от 29.07.2013, «Способ диагностики и

оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока» авторы: Жуковский Ю.Л., Таранов С.И.).

При разработке алгоритмов диагностики состояния силового электрооборудования необходимо учитывать то, что даже в исправном состоянии, при питании от синусоидального источника напряжения, в спектре потребляемого тока, кроме основной гармоники с частотой f присутствуют некоторые дополнительные гармонические составляющие.

При возникновении неисправности электрооборудования машин и технических средств возникают пульсации измеряемых сигналов (тока, напряжения, мощности и т.д.) с частотами, отличными от несущей частоты. Далее производится определение разности амплитуды сигнала спектрограмм диагностируемого оборудования на определенных частотах с эталонными и критическими значениями, полученными на аналогичном заведомо исправном оборудовании. Для примера, на рисунке 3.6 представлена спектрограмма тока технически исправного двигателя. Далее на рисунках 3.7–3.8 представлена спектрограмма однотипных двигателей, имеющих различные виды повреждений [30].

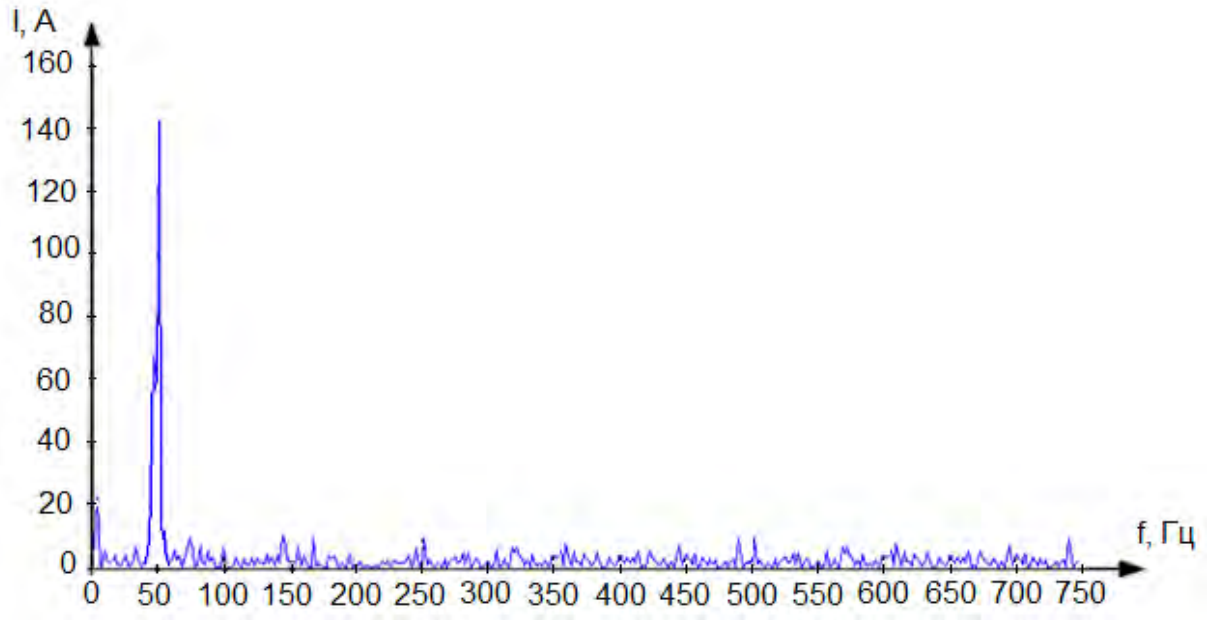

Рисунок 3.6 – Спектрограмма тока технически исправного двигателя

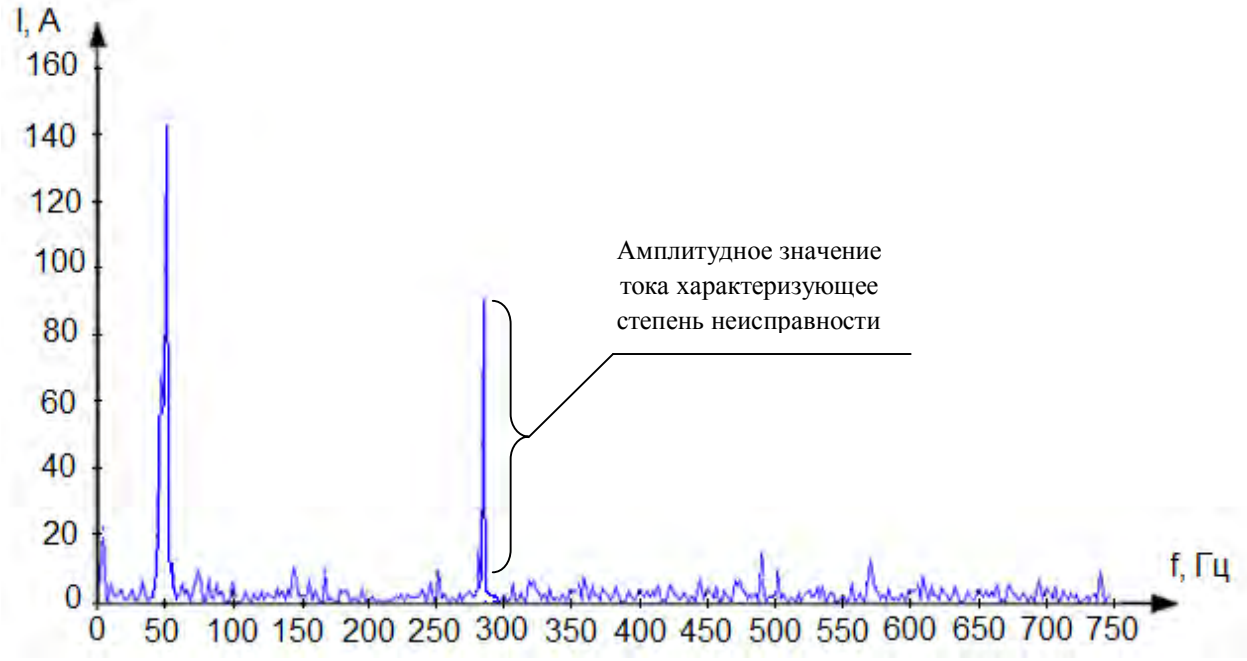

Рисунок 3.7 – Спектрограмма двигателя имеющего повреждение подшипников

Амплитудное значение тока косвенно указывает на степень развития неисправности подшипника характеризуемой частотой, на которой она определенна.

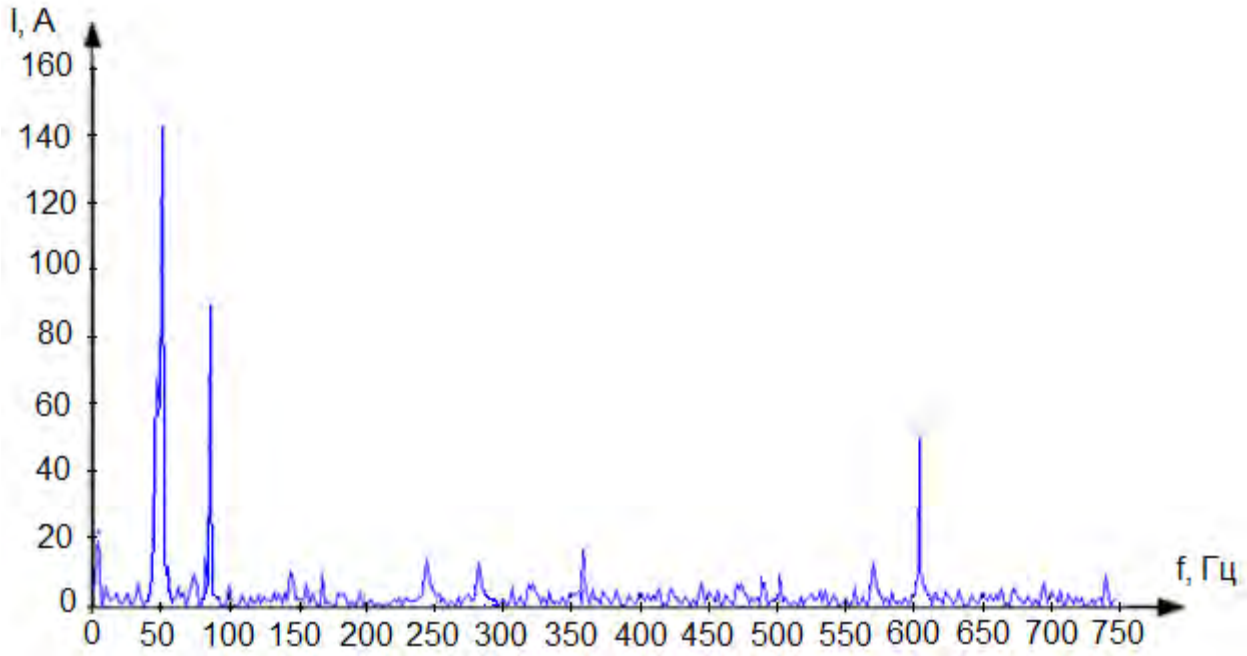

Рисунок 3.8 – Спектрограмма тока электродвигателя имеющего повреждения витков обмотки статора

Неисправности могут характеризоваться нескольким частотными составляющими и различной величиной амплитуды тока, что может свидетельствовать о наличии нескольких неисправностях в одном узле. Касаемо подшипника это может быть разрыв внешнего или внутреннего кольца, повреждение элементов качения и т.д.

Исходя из статистических данных скорости развития неисправности, заранее полученной на неисправном двигателе, можно рассчитать приблизительный срок замены узла, степени развития повреждения витков обмотки статора и т.д., на диагностируемом оборудовании.

Параллельно со спектрограммами тока снимаются спектрограммы напряжения и анализируются тем же образом. По измеренным значениям производится вычисление мощности для каждой частотной составляющей. При увеличении значения потерь мощности при том же режиме работы можно сделать более точный вывод о характере и степени развития контролируемой неисправности.

Следует учесть, что для двигателей различных конструкций, даже со сходными номинальными параметрами, спектры токов и напряжений будут отличаться. Поэтому на начальном этапе необходимо зафиксировать эталонный спектр тока и напряжения, наблюдаемый при исправном состоянии электродвигателя, а также эталонное значение потерь мощности.

В этой связи необходимо использовать интеллектуальные методы многофакторного анализа. При частотном управлении скоростью вращения двигателя основная гармоника частоты f изменяется пропорционально сигналу задания скорости $\omega_з$, причем момент нагрузки, как правило, зависит от скорости. Если для изменения частоты и напряжения, питающего двигатель используются статические преобразователи частоты, то в спектре питающего двигатель напряжения также появляется ряд гармонических

составляющих, величина которых зависит от схемы и режимов работы конкретного преобразователя частоты.

3.4 АЛГОРИТМ НЕПРЕРЫВНОГО ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗЫ ДАННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

При условии создания единой структуры электромеханического оборудования экскаватора и самосвала, значительно упростится состав диагностического оборудования, что в последствие даст весомый экономический и эксплуатационный эффекты. Помимо этого, пополнение базы данных по отказам будет происходить гораздо быстрее, нежели при использовании уникального оборудования и алгоритма для диагностики каждого отдельного электропривода.

Электромеханическое оборудование подвержено значительному риску образования дефектов и неисправностей и имеет достаточно высокую аварийность. Применяемые сегодня методы профилактики и выявления неисправностей позволяют лишь в некоторой степени уменьшить отказы.

Основополагающими задачами диагностики являются:

– выявление рода дефекта и оценка его уровня;

– оперативное определение состояния оборудования в постоянно меняющихся условиях, в которых оно находится;

– определение остаточного ресурса;

– прогнозирование срока службы оборудования до выхода его из строя.

Выполнение последних двух пунктов может быть произведено вручную специалистом по диагностике или автоматически системой диагностики с использованием электронной базы данных развития повреждений. Применение такой базы данных позволит более точно определить состояние оборудования и спрогнозировать его остаточный срок службы и возможный отказ. Такая база может быть реализована с применением fuzzy-логики (нечеткой логики) и при возникновении первых

признаков подобных неисправностей, путем сравнивания эталонных значений и полученных на похожем оборудовании, она будет сообщать об этом.

При раннем выявлении неисправности (износе оборудования) можно будет предупредить серьезные поломки, а также заказать запасные части заранее, что немаловажно для горнодобывающих предприятий, расположенных в отдаленных районах, где доставка запчастей от сервисного центра занимает значительное время.

Решение о применении вида диагностирования, в части его полноты, основывается на технико – экономическом обосновании. Такое решение является чисто потребительским. С одной стороны, ставится задача объективного определения состояния, используя комплекс диагностических параметров и их функциональные связи. С другой стороны, выявляется потребность в ограничении материальных ресурсов, то есть экономика может существенно сужать задачи диагностирования, что может отрицательно сказаться на объективном определении состояния оборудования.

Наиболее эффективным, на наш взгляд, вариантом будет применение системы непрерывной диагностики в режиме реального времени. Под этим подразумевается, что система диагностики будет анализировать объект постоянно, получая информацию о состоянии оборудования от датчиков. Основными составляющими системы будут являться блоки сбора и анализа данных, электронная база данных, наработанная на подобном оборудовании, в совокупности с базой данных по исследуемому объекту с момента ввода его в эксплуатацию.

Диспетчеризация в данном случае позволяет сделать предупреждение о возможной неполадке, исходя из отчета по работе оборудования за исследуемый промежуток времени. Для экскаватора такими неполадками могут являться перегрузки, вызванные негабаритами, возникающими при

работе экскаватора, чрезмерное углубление ковша экскаватора, удары при повороте платформы, броски момента всех приводов экскаватора и т.д. Для самосвала это могут быть перегрузки, вызванные длительными подъемами, превышение грузоподъемности самосвала, неровности дорожного покрытия и т.д.

Система диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования самосвала и экскаватора, на наш взгляд, должна основываться на алгоритме, приведенном на рисунке 3.9.

Суть диагностической системы можно разделить на три составные части:

– процедура построения классификации повреждений по их виду, серьезности и глубине. Построение временных зависимостей развития повреждений;

– изучение неисправности, определение параметров возникновения неисправности (содержание в гармоническом составе напряжения, тока, потребляемой мощности и других снимаемых параметров);

– использование полученной классификации для определения неисправностей отремонтированного оборудования и новых машин, вводимых в эксплуатацию.

Система непрерывной диагностики должна содержать в своем составе датчики температуры, датчики тока и напряжения, анализаторы спектра тока и напряжения, анализатор качества питающего напряжения, вычислители потери мощности, вычислители коэффициента несимметрии и гармоник, датчики вибрации. Структура такой системы представлена на рисунке 3.10.

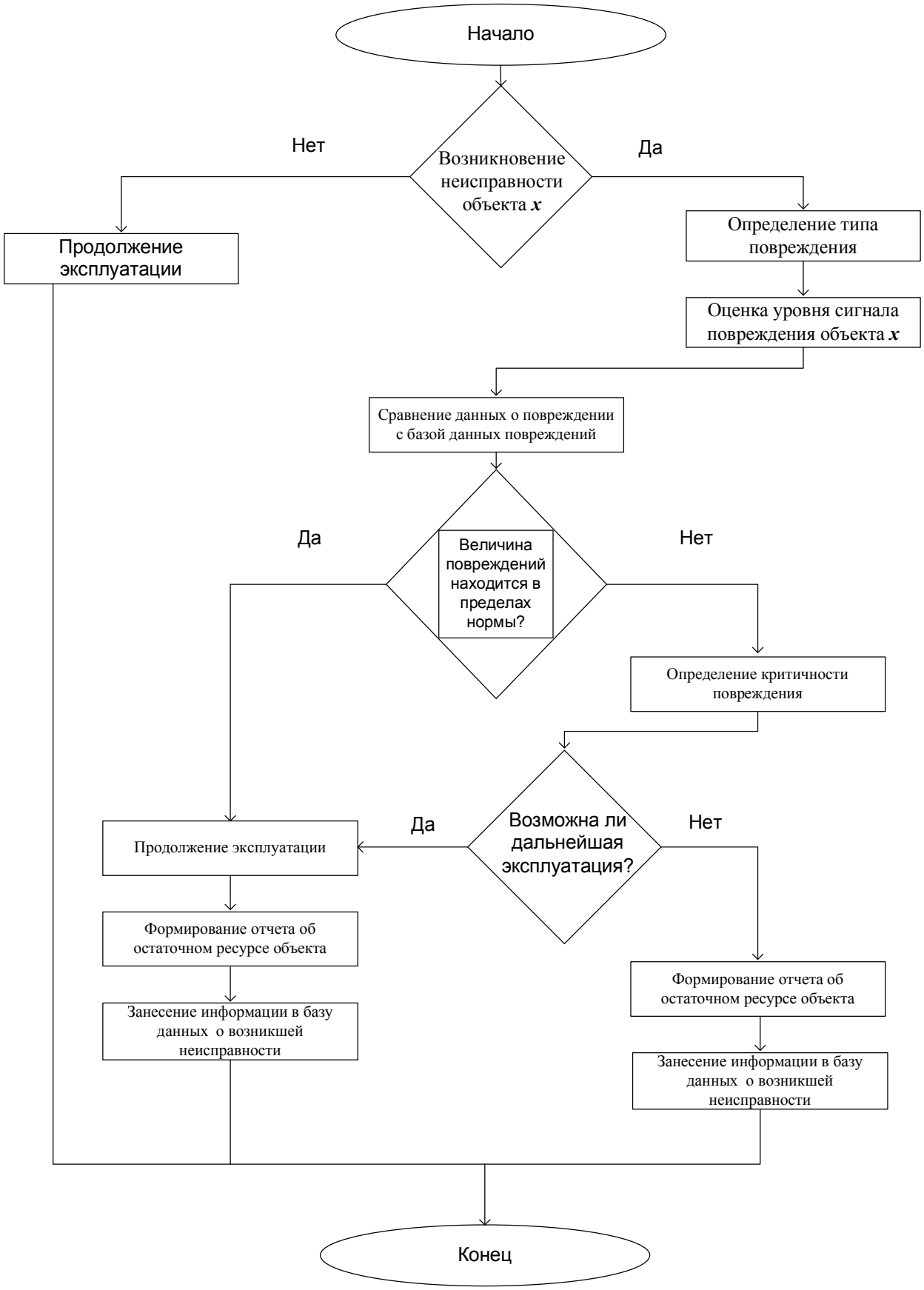

Рисунок 3.9 – Алгоритм непрерывного отслеживания повреждений и оценки остаточного ресурса с использованием базы данных повреждений

Рисунок 3.10 – Структура системы непрерывной диагностики с применением базы данных повреждений

Применение fuzzy–логики для построения базы данных повреждений электромеханического оборудования

Задачей диагностической системы является соотнесение вида повреждения с его степенью к определенному классу повреждения. На вход системы диагностики поступают различные контролируемые параметры, они будут являться множеством признаков для дальнейшей обработки. При помощи диагностического алгоритма обработки и оценки множества этих признаков в заданном пространстве выдается множество выходных переменных. Выходные переменные используются для формирования конечного диагноза, из которого, в свою очередь, формируется отчет о неисправности и высчитывается величина остаточного ресурса ЭМО.

Формирование диагноза - задача многокритериальная и связана, в первую очередь, со сложностью диагностируемого объекта. Здесь возникает необходимость учитывать большое число различных факторов, критериев, параметров, характеризующих работу оборудования. В этой связи при разработке системы непрерывной диагностики возникает проблема адекватности математических методов, которые смогли бы отразить структуру объекта, для которого выполняется диагностика, учитывать неопределенность поступающих данных, скорость их изменения. Наилучшим методом в этой ситуации выступает метод с применением нечеткой логики (fuzzy–логики) как для формализации входных нечетких признаков, так и для установления причинно-следственных связей между ними.

Нечеткая логика основана на теории нечетких множеств, когда истинность рассматривается как лингвистическая переменная. Множество допустимых значений лингвистической переменной называется терм–множеством. Понятие лингвистической переменной играет важную роль в нечетком логическом выводе и в принятии решений на основе

приближенных рассуждений. Если для четких множеств результатом вычисления характеристической функции могут быть только два значения – 0 или 1, то для нечетких множеств это количество бесконечно, но ограничено диапазоном от нуля до единицы. Нечеткая переменная описывается набором *(N,X,A),* где *N* – это название переменной, *X* – универсальное множество (область рассуждений), *A* – нечеткое множество на *X.*

При нечетком моделировании, в основном, используют базу знаний в формате Мамдани, в которой антецеденты (причины) и консеквенты (следствия) правил заданы нечеткими множествами типа «Низкий», «Средний», «Высокий» и т.п. [50]. Нечеткие модели Мамдани являются прозрачными – их структура содержательно интерпретируется в терминах, которые будут понятны и разработчикам, и конечному потребителю. Прозрачность нечетких моделей Мамдани является одним из главных преимуществ, благодаря которому нечеткие технологии успешно конкурируют с другими методами, особенно для тех прикладных задач, где возможность содержательной интерпретации важнее точности моделирования.

Исследуемая после диагностики совокупность, представляет собой конечное множество данных X=($x_1,x_2,\ldots..x_n$), которое называется вектором информативных признаков объекта классификации $c_z \in C, z = \underset{1,k}{\rightarrow}$. Каждый из признаков представляет собой некоторое свойство или характеристику данных рассматриваемой области. Также в рассмотрение вводится конечное множество классов решений $d_1,d_2,\ldots.d_m$.

Задача классификации состоит в выполнении нечеткой импликации вида X=($x_1,x_2,\ldots,x_n$)→y ∈ ($d_1,d_2,\ldots,d_m$). Степень принадлежности объекта X=($x_1,x_2,\ldots,x_n$) классам d_j рассчитывается следующим образом [48]:

$$\mu_{dj}(X) = \frac{s}{p=1,kj}(Wjp * \frac{t}{i=1,n}[\mu jp)]), \qquad (3.47)$$

где

j=$\overline{1,m}$;

s–операция s–нормы, *t*–операция t–нормы, т.е. из множества реализации логических операций *OR (AND)*, при реализации этих функций максимум и минимум соответственно;

$w_{jp} \in [0,1]$ – вес нечетких продукций для *j*–того класса по *p*–признакам x_i– объекта;

k_j–количество правил в базе правил для класса d_j.

В качестве решения Y^* выбирают класс с максимальной степенью принадлежности [48]:

$$Y^* = \underset{\{d1,d2,\dots dm\}}{Agr} \max\left(\mu_{d1}(X), \mu_{d2}(X), \dots, \mu_{dm}(X)\right) \quad , \qquad (3.48)$$

где

Agr – агрегирование результатов нечеткого вывода по каждому правилу базы знаний, реализуемое операцией *t (max)* нечеткой дизъюнкции над степенями принадлежности в нечетком множестве *X*.

В общем случае для диагностической системы конечные термы будут выглядеть следующим образом (рисунок 3.11):

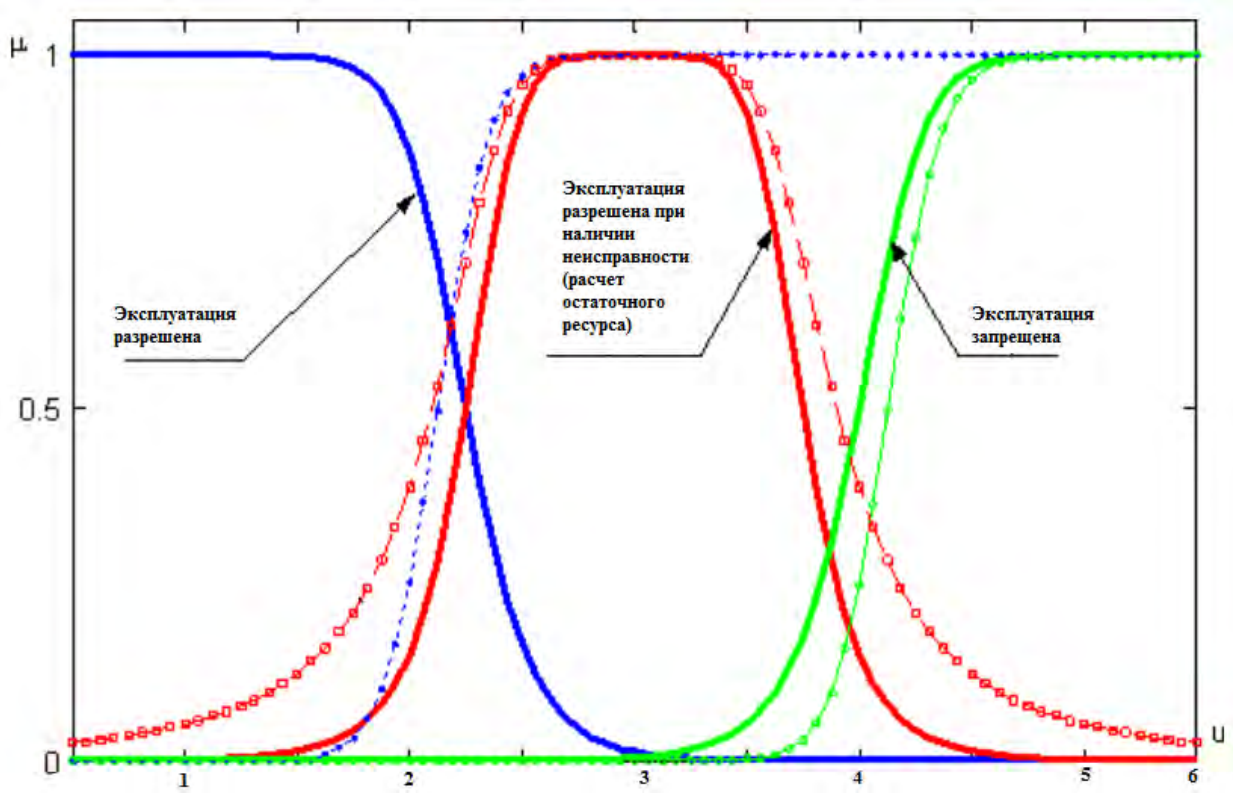

Рисунок 3.11 – Выходные термы функций принадлежности

Построение модели диагностической системы основано на идее замены существующей системы диагностики на систему диагностики с применением баз данных повреждений с обработкой полученных сигналов на основе fuzzy–логики с использованием нечеткого вывода. Компонентная структура диагностической системы на основе обработки данных с применением нечеткой логики представлена на рисунке 3.12

В этом случае модель нечёткой классификации строится с учётом необходимости реализации всех этапов нечёткого вывода и основывается на формальном представлении характеристик исследуемой системы в терминах лингвистических переменных. Поскольку кроме алгоритма классификации основными понятиями здесь являются входные (признаки) и выходные (дефекты) переменные, то именно они рассматриваются как лингвистические переменные при формировании базы правил в нечеткой системе [48].

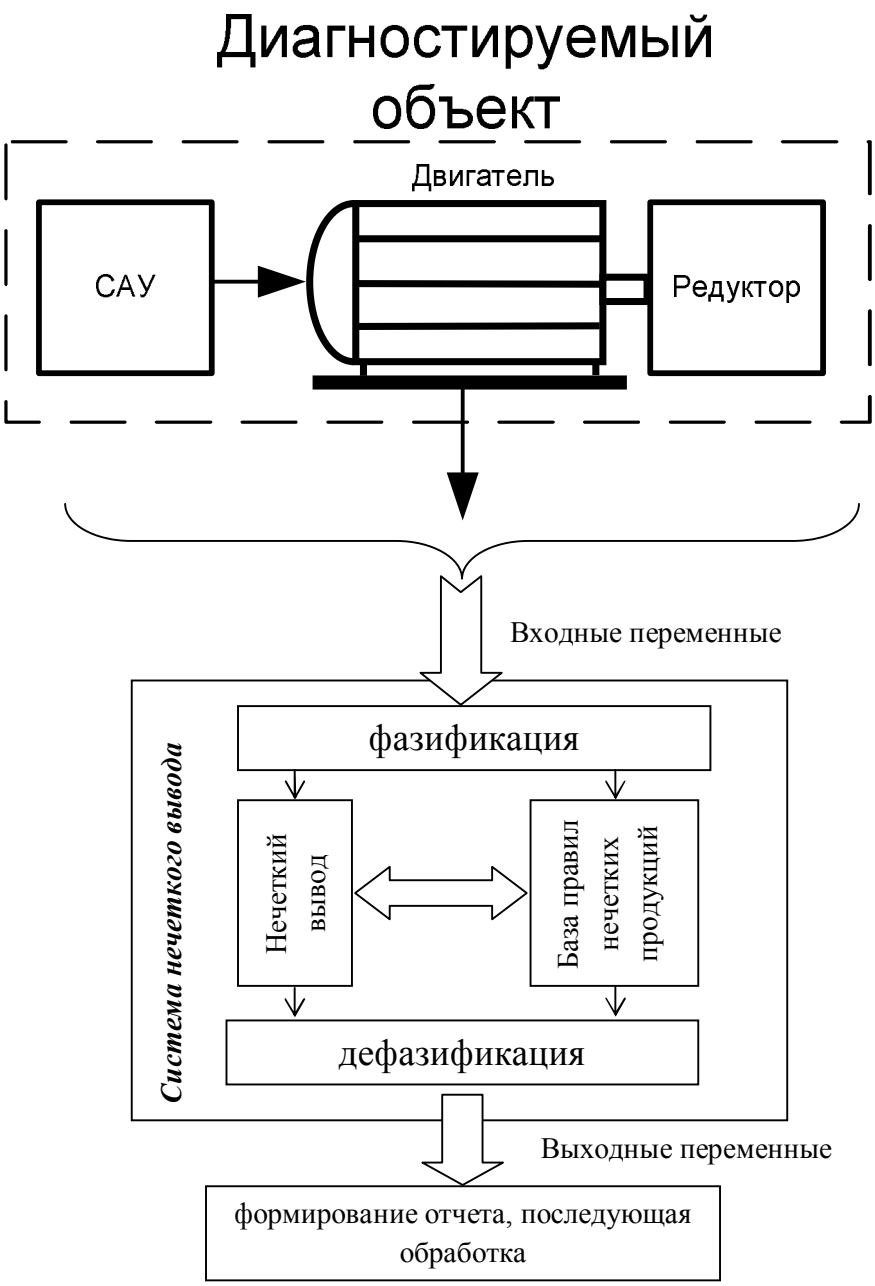

Рисунок 3.12 – Компонентная структура диагностической системы на основе нечеткого вывода

Определяют множество классов технических состояний $d_1, d_2, \ldots d_m$ и множество $X=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ информативных признаков состояния объекта диагностирования $c_z \in C, z = \underset{1,k}{\rightarrow}$; определяют нечеткие термы A_{iq}, где q – количество термов для лингвистической оценки признаков состояния x_i и соответствующие им функции принадлежности; разрабатывают нечеткую базу знаний из r правил, построенную по иерархическому принципу, с использованием которой выполняется оценка технического состояния:

Если ($x_1=a_{1j}$) *и* ($x_2=a_{2j}$) *и .... и* ($x_n=a_{nj}$) *с весом* w_j, *тогда* $y=d_j$, $j=\overline{1,r}$ (3.49)

где

r–количество правил;

d_j – значение консеквента *j*–того правила;

w_j, ϵ [0,1] – весовой коэффициент, задающий достоверность *j*–того правила;

a_{ij} – нечеткий терм, оценивающий признак x_i в *j*–том правиле.

Далее для заданного фиксированного вектора значений входных переменных $X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$ определяют значение функции принадлежности нечетким термам входных переменных. Согласно соотношению (3.47) вычисляют функции принадлежности термов выходных интегральных параметров состояния соответствующих векторов значений входных параметров объекта диагностирования $(x_1,x_2,\ldots,x_n)$.

3.5 ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭМО В ПРОГРАММЕ MATLAB

При математическом моделировании базы данных повреждений использовалась программа MatLab с пакетом расширения Fuzzy Logic Toolbox. Система диагностики должна обеспечивать вывод результата по двум основным направлениям: степени развития отслеживаемой неисправности и общему состоянию исследуемого объекта. Для этого система диагностики имеет два уровня обработки входного сигнала. В качестве примера реализации были выбраны наиболее распространенные повреждения электрических машин:

– неисправности в подшипниковом узле;

– асимметрия ротора;

– межвитковое замыкание обмотки статора;

– асимметрия воздушного зазора.

Входными параметрами для анализа в диагностической системе будут являться выходные сигналы анализаторов спектра тока и напряжения (частота, амплитуда) и значения вычисленной мощности с вычислителя. Рост потерь мощности вычисляется исходя из сопоставления текущего значения потребляемой мощности и значения полученного ранее при выполнении того же вида работ. Входные значения амплитуд тока и напряжения на соответствующей частоте предполагаемой неисправности преобразуются в значения терм–множеств. Алгоритм нечеткого вывода каждой ступени системы диагностики настраивался в «редакторе нечеткого вывода» (Fuzzy Interface System), представленном на рисунке 3.13. В данном редакторе производится выбор нечеткого алгоритма, настройка методов композиции, импликации и агрегации локальных состояний системы, а также определение метода дефаззификации.

В качестве нечеткого алгоритма был выбран алгоритм Мамдани, поскольку он обладает простотой реализации при программировании и позволяет использовать меньшее количество правил, по сравнению с другими существующими алгоритмами.

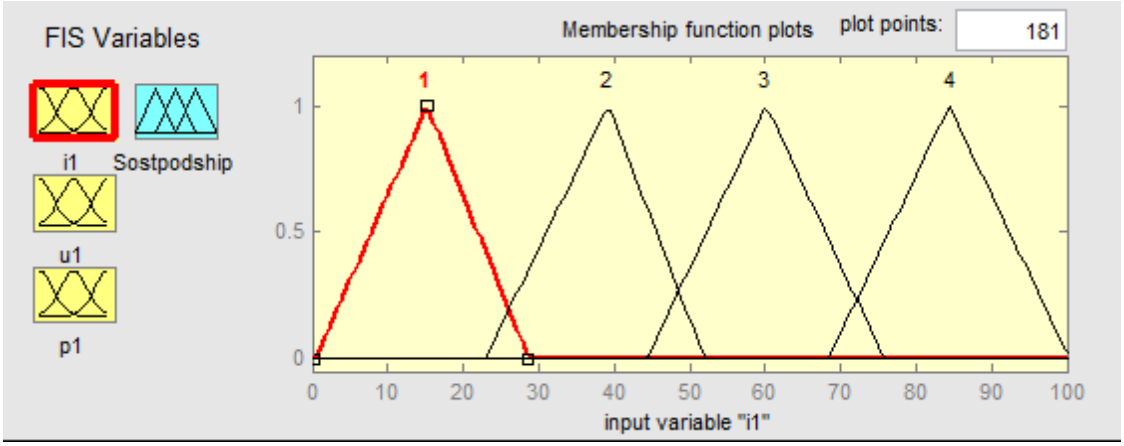

Рисунок 3.13 – Редактор функции принадлежности

Лингвистические переменные задавались треугольной формы для простоты обработки данных. Форма, размер термов по каждой неисправности выбираются и настраиваются согласно статистическим данным, полученным на подобном оборудовании. Величина амплитуды тока и напряжения по выбранной частоте преобразуется во входное значение от 0 до 100 (величина абстрактная), соответствующее развитию неисправности по току или напряжению. Третьей величиной является вычисленные потери мощности, градуируемые также по величине от 0 до 100. Совокупность входных величин, с разным «весом», дает более точное представление о степени развития неисправности в процентом соотношении от исходного состояния объекта (рисунок 3.14).

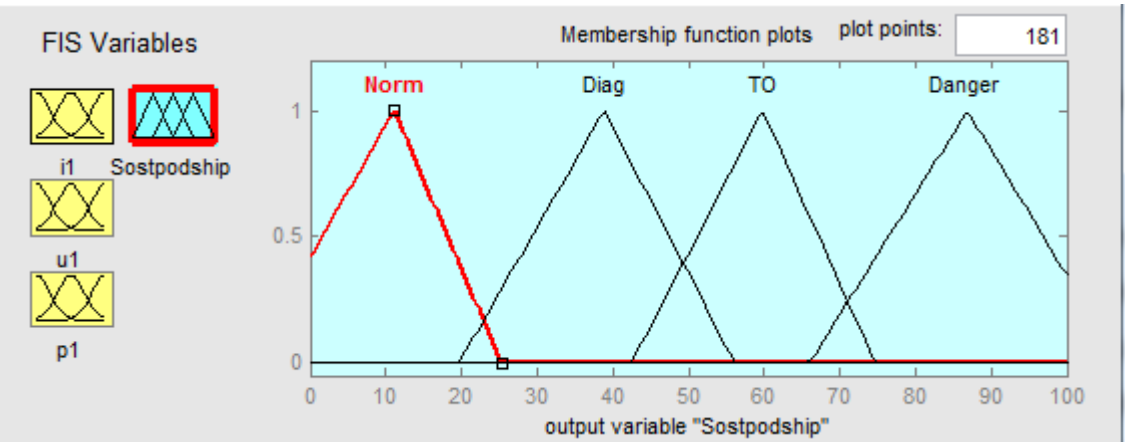

Рисунок 3.14 Выходные значения терм–множеств по исследуемой неисправности

Настройка нечеткой системы осуществлялась путем создания базы знаний по каждой неисправности с учетом ее веса для общего состояния агрегата. База правил для каждой неисправности и вывода общего состояния описывает возможные комбинации термов по каждому лингвистическому параметру и состоит из 256-ти выражений в форме «ЕСЛИ–ТО». Для проверки работоспособности системы используется редактор просмотра правил и редактор просмотра поверхности покрытия.

Имея значения по каждой из выбранных неисправностей мы можем сделать вывод об общем состоянии исследуемого агрегата, дать рекомендации по проведению дополнительных диагностических или ремонтных работ и на основе статистики развития по каждой неисправности спрогнозировать ориентировочное время выхода машины из строя. Выходные значения терм–множеств для получения вывода общего состояния агрегата представлены на рисунке 3.15.

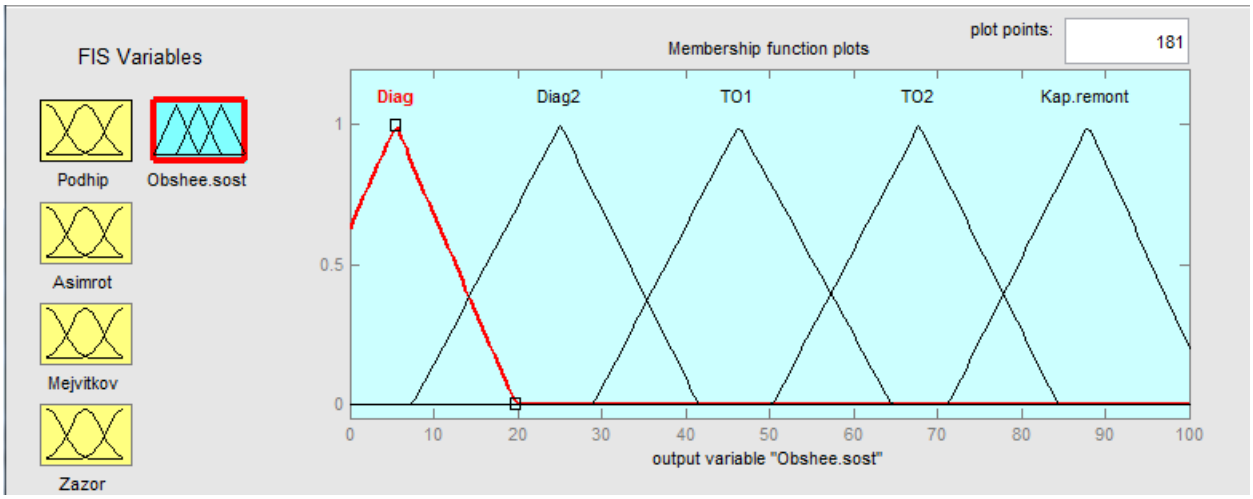

Рисунок 3.15 – Выходные значения терм–множеств

Для простоты обработки данных были заданны выходные термы со следующими значениями: «DIAG» (требуется дополнительная обработка полученных результатов) «DIAG2» (объекту требуется дополнительная экспертная диагностика); «TO1» (необходимо техническое обслуживание) «TO2» (необходимы ремонтные работы); «DANGER» (объект находится в предаварийном состоянии, необходим вывод оборудования из строя и капитальный ремонт).

Выходные значения термов блока определения общего состояния агрегата могут быть различной формы в зависимости от условий, заданных для этого оборудования заранее (экспертной оценки), величины амплитуды, соответствующей неисправности и ее «веса» в для общего состояния агрегата.

Правила вывода представлены на рисунке 3.16 Количество строк соответствует числу правил нечеткого вывода, а количество столбцов – числу входных и выходных переменных, заданных в разрабатываемой системы нечеткого вывода. Дополнительное графическое окно служит для отображения результата нечеткого вывода и операции дефазификации. В каждом окне отображается соответствующая функция принадлежности,

уровень ее среза (для входных переменных) и вклад отдельной функции среза в общий результат (для выходных переменных).

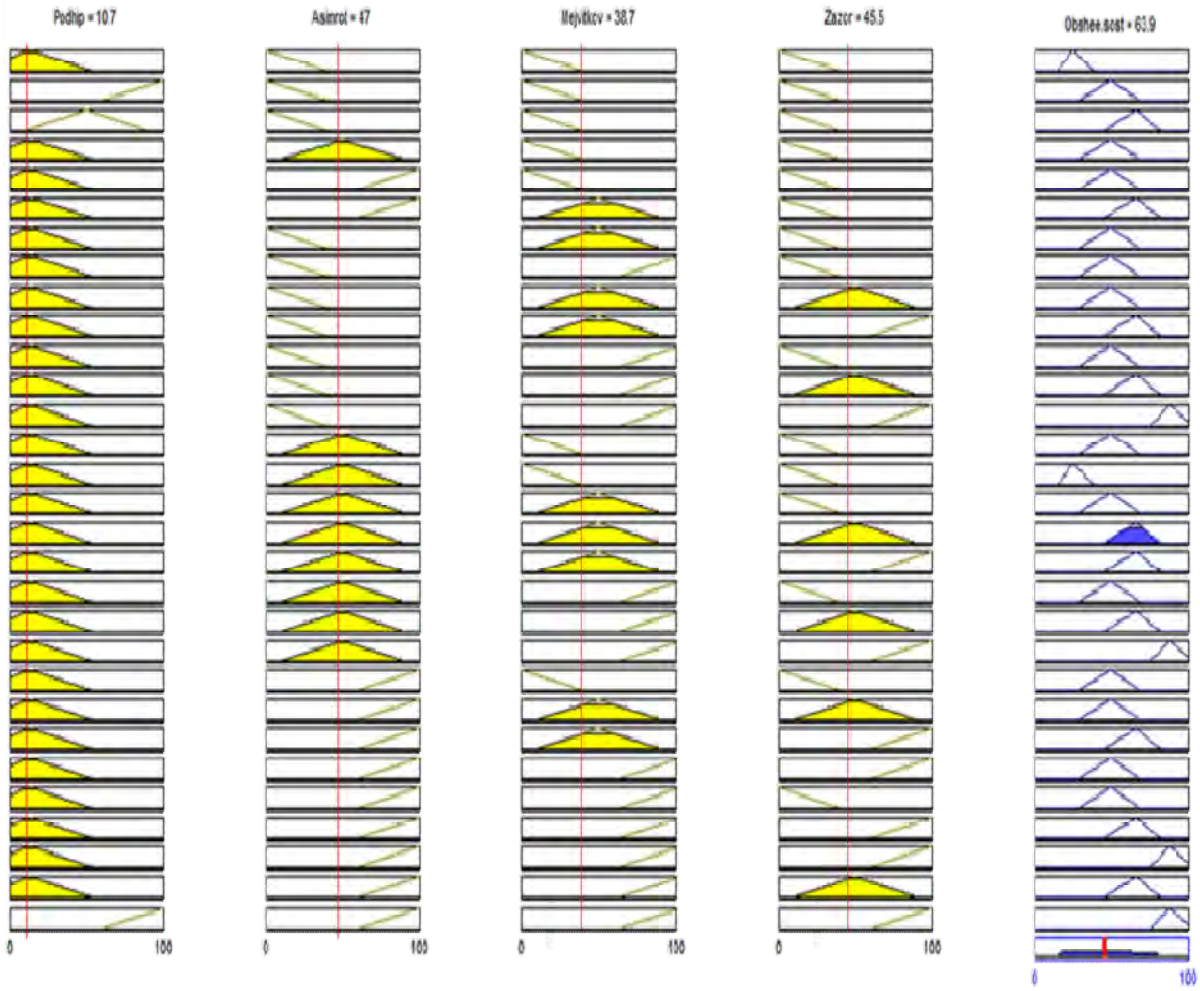

Рисунок 3.16– Правила нечеткого вывода и операции дефазификации

На рисунке 3.17 изображена модель построения базы данных повреждений и расчета остаточного ресурса объекта исследований, построенная в среде Simulink программы MatLab.

Модель является двухуровневой. На первом уровне определяется степень развития по каждой из выбранных неисправностей, на втором уровне определяется общее состояние системы.

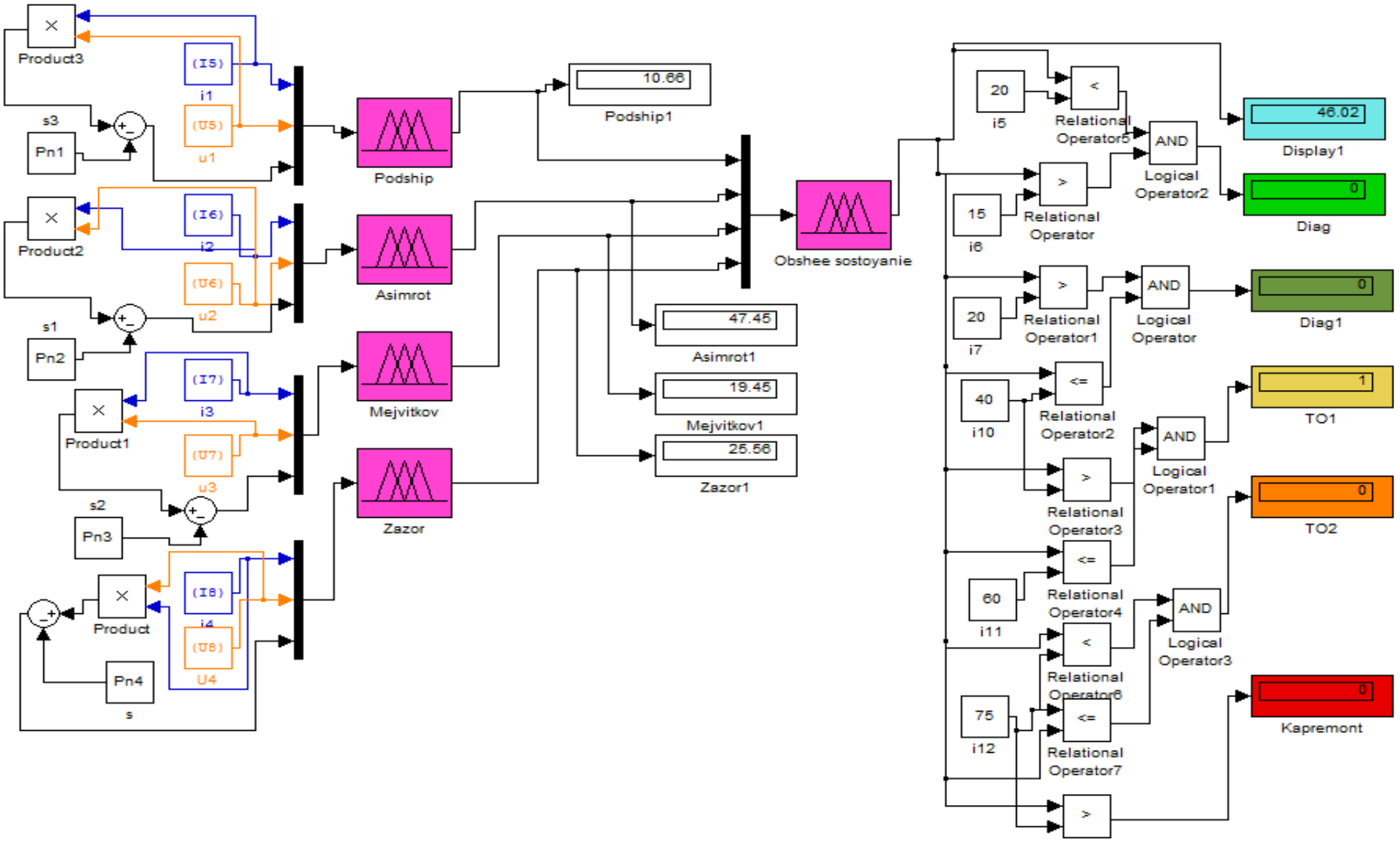

Рисунок 3.17 – Модель системы непрерывной диагностики с применением нечеткой логики в среде Simulink

Схема состоит из следующих элементов: i1, i2, i3, i4, u1, u2, u3, u4 – значения амплитуды тока и напряжения, соответственно, по выбранной неисправности из общего спектра частот тока и напряжения; S, S1, S2, S3 – значение исходных потерь мощности при исправном оборудовании; «Podship», «Asimrot», «Mejvitkov», «Zazor», «Obshee sostoyanie» – контроллеры нечеткой логики анализа неисправности подшипника, асимметрии ротора, межвитковых замыканий, асимметрии воздушного зазора и оценки общего состояния агрегата, соответственно. На выходе из системы мы имеем значение развития каждой неисправности в процентом соотношении от общего ресурса узла, значение общего состояния агрегата и рекомендаций по проведению работ (значение «1» соответствует наличию сигнала на дисплее). При формировании вывода были заданы следующие отношения по общему состоянию машины:

– от 0 до 15% износа – система находится в рабочем состоянии, никаких дополнительных действий, кроме записи показаний системы не требуется;

– от 15 до 20% износа – уровень «DIAG». Требуется дополнительная обработка данных полученных в ходе диагностики. Данный уровень подразумевает обработку данных для определения возможных неконтролируемых в данный момент неисправностей, косвенно влияющих на значения амплитуд контролируемых частот или показания потерь мощности;

– от 20 до 40% износа – уровень «DIAG2». Требуется дополнительная диагностика специализированным переносным оборудованием, позволяющим более точно определить род и степень развития неисправности;

– от 40 до 60% износа – уровень «ТО1». Требуется техническое обслуживание первого уровня (ревизия, осмотр, проверка состояния узлов), без вывода оборудования из строя;

– от 60 до 75 % износа – уровень «ТО2». Требуется техническое обслуживание второго уровня (замена подшипников, отстройка систем

управления, проверка состояния изоляции и т.д.) возможен временный вывод оборудования из строя;

– свыше 75% износа – уровень «Danger». Требуется вывод оборудования из строя, вследствие или для предотвращения аварии.

Для реализации работы модели задавался массив данных (рисунок 3.18) имитирующий получаемые спектры частот тока и напряжения. Затем из диапазона частоты соответствующего виду неисправности выбиралось наибольшее усредненное значение. Описание программы приведено на рисунке 3.19.

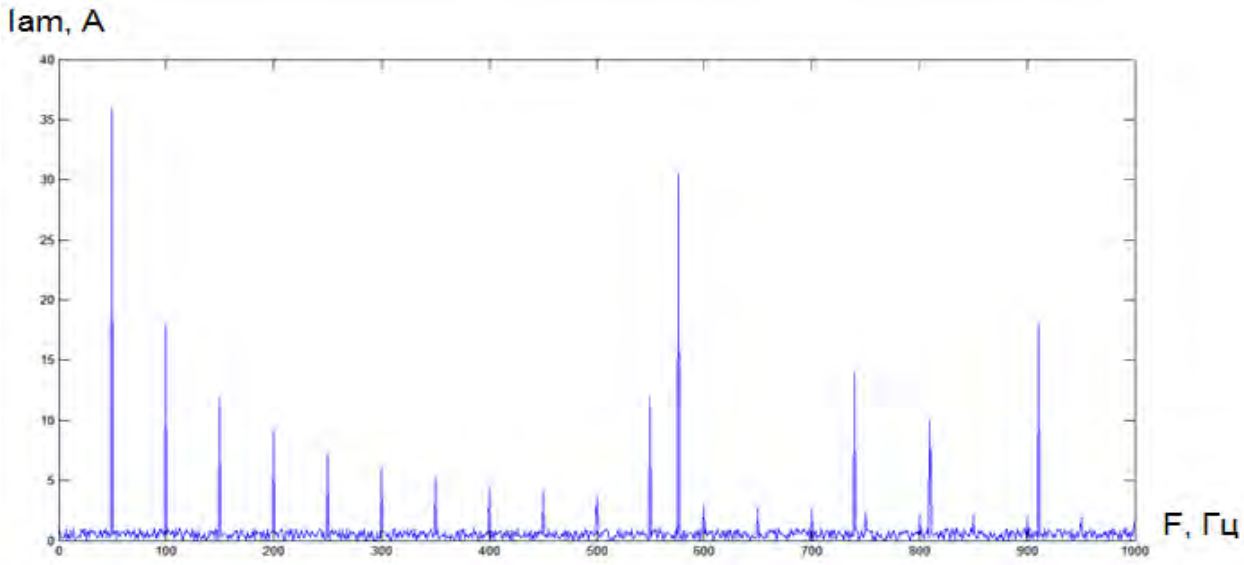

Рисунок 3.17 – Графическое представление массива данных спектра тока

На выходе системы мы будем иметь конкретный результат диагностики о наличии неисправности в режиме реального времени. Далее после дополнительной обработки полученных архивированных данных мы сможем сделать вывод о наличии неисправности, которая соответствует частоте и амплитуде тока и напряжения при вычисленной потребляемой мощности.

3.6 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Существующая система обслуживания электромеханического оборудования по принципу планово-предупредительных ремонтов является низкоэффективной из-за большого количества времени простоя экскаваторов и самосвалов. Наиболее эффективной системой обслуживания для горно–транспортного комплекса является система, основанная на принципе диагностики остаточного ресурса и обслуживания электромеханического оборудования по его фактическому состоянию. Переход к указанному принципу позволит сократить время простоя электрооборудования экскаваторов и самосвалов за счет предотвращения развития серьезных неисправностей на стадии их возникновения, сократит загруженность складов с необходимыми запасными частями, позволит спрогнозировать выход из строя электромеханического оборудования.

2. Сопоставление существующих диагностических методов и результатов, полученных при их использовании, позволяет сделать вывод о необходимости применения методов определения неисправностей и остаточного ресурса оборудования методами ваттметрографии спектрального состава токов и напряжении, генерируемых при работе тяговых электроприводов переменного тока самосвалов и главных приводов экскаватора, с одновременным сопоставлением их с существующими базами данных неисправностей приводов такого же типа, продиагностированных ранее.

3. Применение методов спектрального анализа для определения фактического состояния электромеханического оборудования экскаватора и самосвала позволяет оценить величину дополнительных потерь, обусловленных развитием повреждений, что в совокупности с наработанной базой знаний о предшествующих неисправностях и используется в качестве способа оценки технического состояния электропривода.

4 ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ СОСТАВУ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

При эксплуатации по фактическому состоянию контроль технического состояния выполняется либо с определенной периодичностью, либо в режиме реального времени, а момент начала ремонта и объем восстановления определяются техническим состоянием электрооборудования. Для предсказания возможных отклонений в режимах работы обследуемых объектов, первоочередной задачей является установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов. Для организации такого обслуживания необходимы средства, позволяющие оценить состояние оборудования на данный момент времени, проследить изменение состояния за последнее время и осуществить прогноз его на ближайшее будущее.

4.1 ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭМО ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Структурная схема технической реализации системы диагностики для определения состояния электромеханического оборудования ГТК представлена на рисунке 4.1.

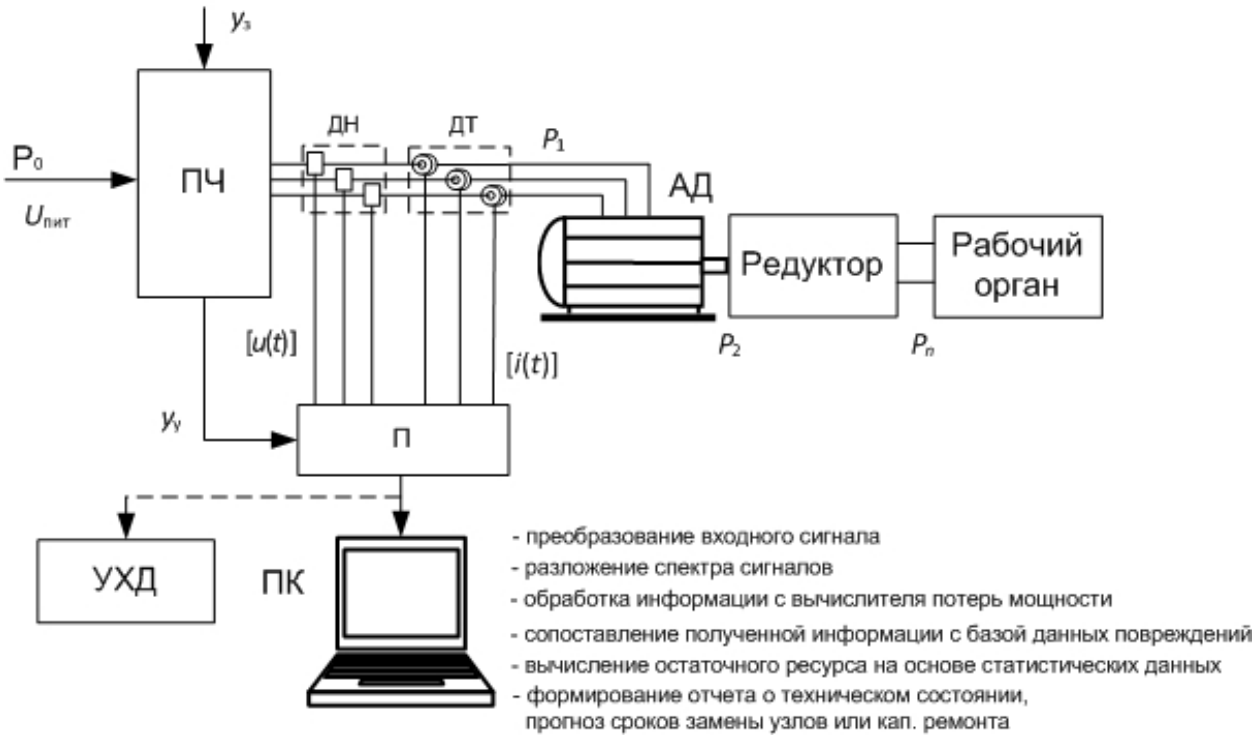

Рисунок 4.1 – схема технической реализации системы диагностики по электрическим параметрам

Система диагностики технического состояния электромеханического оборудования ГТК реализуется описанным ниже образом. На вход преобразователя частоты ПЧ из питающей сети поступает мощность P_0, который в соответствии с введенным в него заданием $y_з$ осуществляет управление координатами скорости и момента асинхронного двигателя – АД. С выхода ПЧ на АД поступает мощность:

$$P_1=P_0-\Delta P_1 \text{ , кВт,} \quad (4.1)$$

где

ΔP_1–потери мощности на преобразование, кВт;

P_0–мощность, поступающая на ПЧ.

Мощность на выходе электродвигателя будет равна:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_2 \text{ , кВт,} \quad (4.2)$$

где

ΔP_2–потери мощности на преобразование электрической энергии в механическую, кВт.

Механическая мощность P_2 поступает на редуктор, на выходе которого образуется мощность:

$$P_{n.} = P_2 - \Delta P_3 \text{ , кВт,} \quad (4.3)$$

где

ΔP_3–потери мощности на преобразование частоты вращения в редукторе, кВт.

Мощность P_n подается на рабочий орган (главные механизмы экскаватора или колесо самосвала). Измеренные сигналы трехфазного напряжения [$u(t)$] и трехфазного тока [$i(t)$], поступающие с датчиков напряжения ДН и датчиков тока ДТ, соответственно, и сигнал управления y_y с ПЧ, поступают на вход преобразователя – П.

Преобразованные и отфильтрованные сигналы напряжения и тока, а также информация о потерях мощности поступают в устройство хранения данных (УХД) или компьютер (ПК). Устройство хранения данных обеспечивает цифровую обработку, запись и хранение информации, поступающей с преобразователя. Сигналы напряжения и тока, поступившие в компьютер после преобразователя, раскладываются в спектр, анализируются, вносятся в базу данных и обрабатываются (при формировании статистики отказов), после чего осуществляется определение фактического состояния ЭМО и производится расчет остаточного ресурса с выводом отчета и рекомендаций по срокам проведения ремонтных работ.

4.2 АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ВАТТМЕТРОГРАФИИ

Для реализации систем диагностики по спектральному составу тока, напряжения и вычисленного значения потребляемой мощности необходимы технические средства, датчики и преобразователи, обеспечивающие необходимую точность. В системе могут быть применены [30]:

1) Измерительные трансформаторы тока с выходным током 5 А (входной ток – максимальный ток диагностируемого агрегата в штатном режиме его работы), рассчитанные на номинальную частоту тока, либо датчики тока на основе индуктивных катушек или датчиков Холла со стандартными выходными сигналами - 0…5 В, -5…+5 В, -10…+10 В, 0…20 мА, 4…20 мА, 0…5 мА (конкретный тип масштабного преобразователя определяется типом вторичных преобразователей). Количество первичных преобразователей определяется общим суммарным количеством используемых фаз. При использовании датчиков типа «токовые клещи» возможно поочередное измерение токов каждой из фаз с помощью одного датчика. Первичные преобразователи должны иметь класс точности не менее 0,5 и должны быть рассчитаны на эксплуатацию в тех же условиях, что и диагностируемые агрегаты;

2) Измерительные трансформаторы напряжения с выходным напряжением 220 или 100 В (входное напряжение – максимальное фазное напряжение диагностируемого агрегата), рассчитанные на номинальную частоту тока, либо датчики напряжения на основе индуктивных катушек или датчиков Холла со стандартными выходными сигналами - 0…5 В, - 5…+5 В, - 10…+10 В, 0…20 мА, 4…20 мА, 0…5 мА (конкретный тип масштабного преобразователя определяется типом вторичных преобразователей). Количество первичных преобразователей определяется общим суммарным

количеством используемых фаз. Возможно также поочередное измерение фазных напряжений с помощью одного датчика. Первичные преобразователи должны иметь класс точности не менее 0,5 и должны быть рассчитаны на эксплуатацию в тех же условиях, что и диагностируемые агрегаты (принципиально возможно использование существующих на объекте первичных или масштабных преобразователей, однако при этом точность и достоверность диагностической информации не гарантируется);

3) Измерительные делители напряжения с выходным напряжением 5 или 10 В (входное напряжение – максимальное фазное напряжение диагностируемого агрегата). Первичные преобразователи должны иметь класс точности не менее 0,5 и должны быть рассчитаны на эксплуатацию в тех же условиях, что и диагностируемые агрегаты.

С точки зрения возможностей автоматизации измерений, целесообразно применение цифровых приборов, имеющих возможность связи с ЭВМ по стандартным последовательным интерфейсам (*USB*, *RS*232 и т.д.), либо использование плат или модулей сбора данных [30].

Для измерения мгновенных значений диагностических параметров необходимо использовать средства сбора данных, обеспечивающие быстродействие не менее:

$$t_{пр} \le \frac{1}{10 f}, \tag{4.4}$$

где

f – номинальная частота соответствующего сигнала, Гц.

Анализаторы спектра должны обеспечивать в реальном времени быстрое Фурье преобразование (*FFT*) всех измерительных сигналов, с частотным диапазоном не менее

$$f_{пр} \ge 50 \cdot f, \quad \text{Гц} \tag{4.5}$$

В общем случае частота дискретизации должна быть не менее 3 кГц (при номинальной частоте двигателя 50 Гц), количество замеров – не менее 4096 дискретных отсчетов (время измерения – не менее 5 сек).

Для автоматизации диагностических операций целесообразно использовать устройства сбора данных со встроенным цифровым сигнальным процессором (*DSP*), обеспечивающим выполнение *FFT* (fast fourier transformation–быстрое преобразование Фурье) на аппаратном уровне в реальном времени. Для связи устройств сбора данных с ЭВМ целесообразно использовать стандартные промышленные интерфейсы и протоколы передачи данных.

Реализовать фиксацию и хранение измеренных значений тока, напряжения и мощности возможно посредством модульного анализатора качества UMG 511 компании Janitza GmbH (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 – Анализатор качества Janitza UMG 511

Данный прибор позволяет измерить и оцифровать действующие значения токов и напряжений с частотой до 70 Гц. Встроенный микропроцессор вычисляет электрические параметры от значений выборки. Соответствующее напряжение может быть определено как линейное или фазное напряжение для измерения в трехфазной системе. Сферы применения:

– непрерывный контроль качества мощности, например EN 50160;

– ethernet шлюз для подключения вторичных измерительных приборов;

– анализ электрических проблем и дефектов сети;

– контроль внутренней системы распределения в соответствии с ГОСТ 51317 4-30-2008;

– генератор отчётов для EN 50160 анализов;

– удалённое управление.

Данный прибор имеет 4 измерительных канала для тока и напряжения. Первые три канала (измерение основной линии) предназначены для использования в трехфазной системе. Внутренняя память прибора –256 МВ для непрерывной регистрации всех измеряемых данных. Память измеряемых значений свободно конфигурируема в отношении выбора измеряемых величин, которые должны быть записаны, и интервалов времени записи. Интервал записи - среднее время соответствующей измеряемой величины. Кроме того, максимальные и минимальные действующие значения (время усреднения 200 мс) могут быть сохранены в пределах этих интервалов.

Цветной ЖК-дисплей UMG 511 с активной матрицей (5,7 дюймов) и подсветкой позволяет отображать значения измерений в числовой форме, в виде гистограммы или линейного графика. Выбранные дисплеи могут автоматически сменяться с выбранным интервалом времени (авторотация дисплея). Устройство программируется при помощи текстового меню на дисплее или программного обеспечения GridVis. Основные возможности:

– измерение качества мощности в соответствии с DIN EN 61000-4-30;

– метод измерения класса A;

– анализ Фурье с 1ой по 63ю гармоники для U-LN, U-LL, I, P (потребление/генерация) и Q (инд./емк.);

– измерение обычных и промежуточных гармоник (U-LN, U-LL, I) в соответствии с DIN EN 61000-4-7;

– анализ и оценка по DIN EN 50160 при помощи программного обеспечения GridVis для анализа и программирования;

– непрерывная выборка с входов тока и напряжения с частотой 20кГц;

– запись более чем 2000 различных измеряемых параметров за цикл измерения (200мс);

– обнаружение переходных процессов >50мкс и запись до 16.000 выборок;

– регистрация данных / Память событий (256MB Flashdisk);

– 8 цифровых входов и 5 цифровых выходов;

– ethernet (Web-Server, E-Mail, опционально BACnet);

Переходные процессы регистрируются с периодом больше чем 50мкс. События, как например, скачки тока, падение напряжения или перенапряжение могут быть благополучно сохранены за полупериод.

Плата сбора данных *NI PCI*-6023E - это многофункциональное устройство, имеющее достаточную точность, использующее мультиплексирование (рисунок 4.3).

Рисунок 4.3 – Плата сбора данных *NI PCI*-6023E

Данная плата подходит как для приложений непрерывного сбора и анализа данных, так и для измерений высоких напряжений при

использовании совместно с устройствами согласования сигналов. Технические характеристики платы сбора данных представлены в таблице 4.1 [110].

Таблица 4.1 – Технические характеристики *NI PCI*-6023E

Параметр	Значение
Шина	*PCI*
Аналоговые входы: - в режиме с одним заземленным концом - в дифференциальном режиме	 16 *SE* (8 *DI*) *SE* DI
Частота оцифровки сигналов, кГц	200
Разрешение АЦП, бит	12
Максимальное входное напряжение, В	от ±0.05 до ±10
Цифровые каналы ввода/вывода	8
Счетчики, разрядность	2, 24
Синхронизация	цифровая.

Устройство согласования сигналов *NI CB*-68*LPR*. Данное устройство предназначено для связи датчиков с платой сбора данных и имеет 68 портов.

Кабель NI R6868 предназначен для связи между платой сбора данных и устройством согласования (рисунок 4.4).

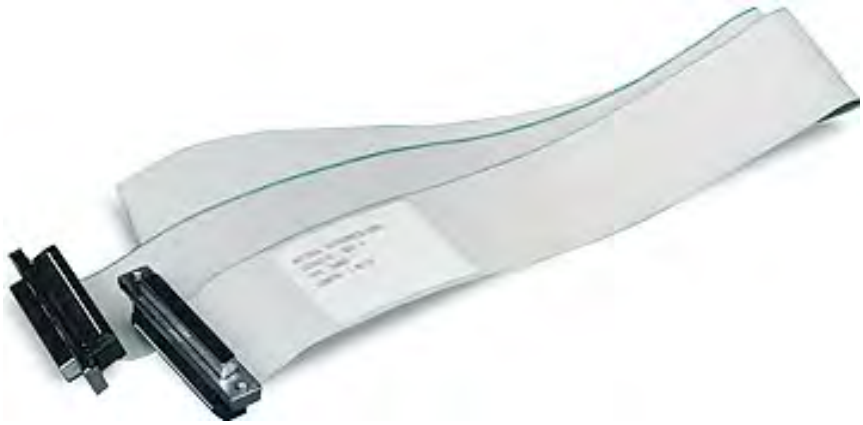

Рисунок 4.4 – Кабель *NI R*6868

Модульная система *NI CompactDAQ* (рисунок 4.5) позволяет реализовывать быстрые, точные измерения с помощью подключения шины *USB*. Модульный дизайн позволяет проводить измерения физических, электрических, механических и акустических сигналов в пределах одной системы по 256 каналам. Кроме того, наличие АЦП на каждом модуле и индивидуальная изоляция каждого модуля обеспечивают быстрые и надёжные измерения. Многие системы сбора данных имеют жестко заданную функциональность, к ним можно подключать только датчики определённого типа. Некоторые модульные системы способны проводить измерения только медленных или статических сигналов. *NI CompactDAQ* может измерять динамические сигналы, такие как звук, вибрации, давление и переходные процессы в электрических сигналах со скоростями до 50 Гц. Все модули синхронизированы автоматически, высокоскоростная передача данных со всех модулей аналогового и цифрового ввода/вывода в рамках одной системы производится через одно *USB* подключение. При этом используется производительность и возможности хранения данных персонального компьютера. Если возникает необходимость хранить большие объемы данных или ускорить их обработку, достаточно просто обновить ПК вместо того, чтобы покупать новый, более современный прибор. Добавление измерений нового типа или увеличение количества каналов достигается встраиванием новых модулей в шасси. В системе используются твердотельные мультиплексоры, которые не изнашиваются и могут производить переключение со скоростями до 250 тысяч раз в секунду, что делает их подходящими для высокоскоростных измерений [110].

Совокупность данных устройств позволяет создать стационарный аппаратно-программный комплекс диагностики асинхронного электропривода переменного тока, который может осуществлять непрерывный контроль диагностируемых параметров и автоматически сохранять измерения в базе данных. Данный подход удобен на стадии сбора

статистики для однотипных агрегатов или наблюдения в режиме реального времени за изменением определенных диагностируемых параметров при изменении режима работы привода или моделировании неисправности, например, искусственное создание электромагнитной несимметрии. Сохранение измерений при этом может происходить как с заданным интервалом времени, так и при определенном условии, например при превышении значения коэффициента потерь мощности на заданную величину.

4.3 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНО–ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Высококачественные технические средства и мощная среда проектирования *LabVIEW* корпорации *National Instruments* позволяют разработать многофункциональный комплекс для исследований и эксплуатационного обслуживания электрооборудования, который может быть легко адаптирован для применения в других отраслях техники. *LabVIEW* является универсальной средой программирования, так как в ней могут обрабатываться сигналы, полученные с плат сбора данных сторонних фирм производителей. Также возможна обработка сигналов, записанных на жесткие носители, что значительно облегчает задачу технического персонала, так как нет необходимости в перемещении к диагностируемому оборудованию системного блока персонального компьютера, содержащего обширную базу данных. Сигналы могут быть записаны с помощью портативных мобильных устройств сбора данных, а затем перенесены на персональный компьютер, содержащий базу данных для последующей обработки и расчета остаточного ресурса электрооборудования [30].

Принятая структура программного обеспечения позволяет сравнительно просто компоновать программные модули для создания автономных специализированных виртуальных приборов, реализующих сокращенный набор функций, например, осциллографа или анализатора спектра и т.п., модифицировать набор реализуемых виртуальной лабораторией функций, использовать различные технические средства, заменяя только модули, ответственные за взаимодействие с аппаратурой, не изменяя при этом модули обработки и визуализации.

Сбор данных выполняется программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС), выполненной на языке графического программирования

LabVIEW. Фрагмент программного кода, отвечающего за сбор данных, изображен на рисунке 4.5.

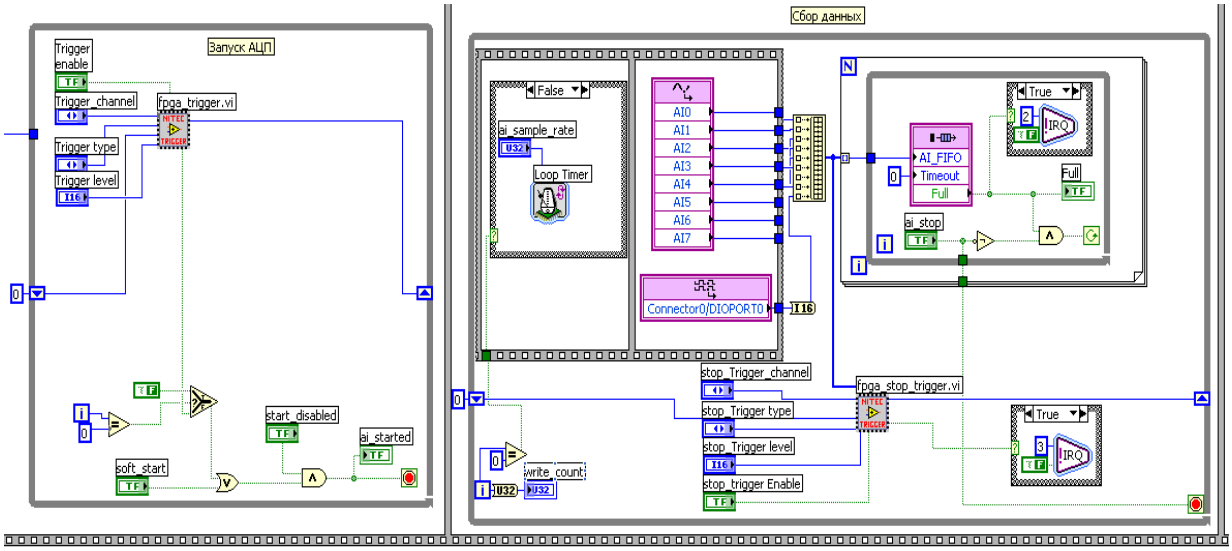

Рисунок 4.5 – Блок-диаграмма программируемой логической интегральной схемы – «сбор данных».

В ПЛИС аппаратно реализован высокоскоростной непрерывный буферизированный сбор данных с условным запуском или остановом и программируемым интервалом дискретизации. Для хранения собранных в результате измерений данных организован буфер на каждый входной канал, контроль за переполнением которого осуществляется узлом формирования запроса на прерывание.

Передача результатов измерений в программы верхнего уровня организована с использованием функций модуля реального времени *LabVIEW Real Time*.

Программные модули анализаторов сигналов

Пользователь может наблюдать данные со всех устройств на экране виртуального прибора и сохранять их в файлы или базу данных. Наиболее важные из инструментов описаны ниже.

Анализатор спектра – это инструмент, являющийся первым из списка виртуальных анализаторов, позволяющий производить анализ Фурье гармоник и смешанных частот. Инструмент способен отображать сигналы, как во временном, так и в частотном представлении. Для каждого из измеренных сигналов (мощность или ток) производится измерение амплитудного и фазового спектра. FFT-анализатор отображает направление потока мощности для каждой отдельной гармоники. При этом на экране FFT-анализатора пользователь может наблюдать амплитуды выбранных спектральных компонент.

С помощью инструмента «монитор мощности», входящего в состав блока расчета потерь мощности, пользователь может оценить величину мощности, рассчитанную на основе мгновенных величин сигналов тока и напряжения. Программное обеспечение данного инструмента создано таким образом, чтобы скомпенсировать ошибки, вызванные нелинейностью и частотной зависимостью характеристик, используемых измерительных преобразователей. Данная коррекция позволяет скомпенсировать фазовые искажения, вносимые, например, токовыми клещами, часто используемыми при измерении тока в силовых сетях. Анализатор предоставляет пользователю возможность наблюдения фазовых состояний на векторной диаграмме, динамически обновляемой в режиме реального времени.

Монитор напряжения – это инструмент, входящий в состав блока анализатора качества питающего напряжения и служит для анализа качества электрической энергии. В результате пользователь получает комплексный обзор всех параметров качества, измеренных согласно данному стандарту. Пользователь может самостоятельно устанавливать уровни обнаружения падения или возрастания определенных показателей качества. Например, в случае возникновения падения напряжения производится сохранение временной зависимости сигнала как до, так и после момента падения напряжения.

Реализация подпрограммы спектрального анализа в среде *LabVIEW*

Спектральный анализ – это один из наиболее распространенных и наглядных методов обработки сигналов. Описанный ниже программный модуль позволяет применить в локальном режиме такие методы спектрального анализа, как методы Блекмана-Тьюки и Кули-Тьюки [1] (которые являются классическими и хорошо известными), а также метод максимальной энтропии [52] и ряда других методов [25, 33]. Один из них является модификацией метода максимальной энтропии и существенно улучшает точностные характеристики последнего. Суть этого метода заключается в том, что устраняется влияние шума на измеряемые характеристики спектра применением корреляционного метода измерения и дополнительным вычислением автокорреляционной функции 2-го порядка перед вычислением самого спектра.

Электромеханическое оборудование может быть описано моделью полигармонического сигнала на фоне шума.

На стороне удалённого пользователя устанавливается модуль Run-Time Engine, входящий в состав интегрированной среды разработки *LabVIEW*. Этот модуль обеспечивает возможность удалённого доступа к интерфейсам пользователя программ на языке *LabVIEW* [30].

В каждом из режимов работы предусмотрены следующие подрежимы исследования модели полигармонического сигнала на фоне шума для каждого из методов спектрального анализа: оценивание амплитуды гармонических составляющих; оценивание частоты гармонических составляющих; оценивание разрешающей способности по частоте выбранного метода спектрального анализа. Оценивание точности измерения амплитуды и частоты выполняется с помощью статистического моделирования по выборке данных, размер которой указывается пользователем. Предусмотрена возможность исследования таких

зависимостей точности оценивания, как зависимость ее от отношения сигнал/шум, длительности выборки, порядка модели и др. Все эти зависимости в виде абсолютной погрешности и среднеквадратического отклонения автоматически выводятся в графическом виде на интерфейс пользователя и запоминаются на жестком диске [30].

На рисунке 4.6 для примера приведен интерфейс пользователя в режиме оценки частоты гармонического сигнала в шуме. Данный интерфейс пользователя позволяет выполнять исследование погрешности определения частоты для каждого из исследуемых методов спектрального анализа с учётом влияющих параметров.

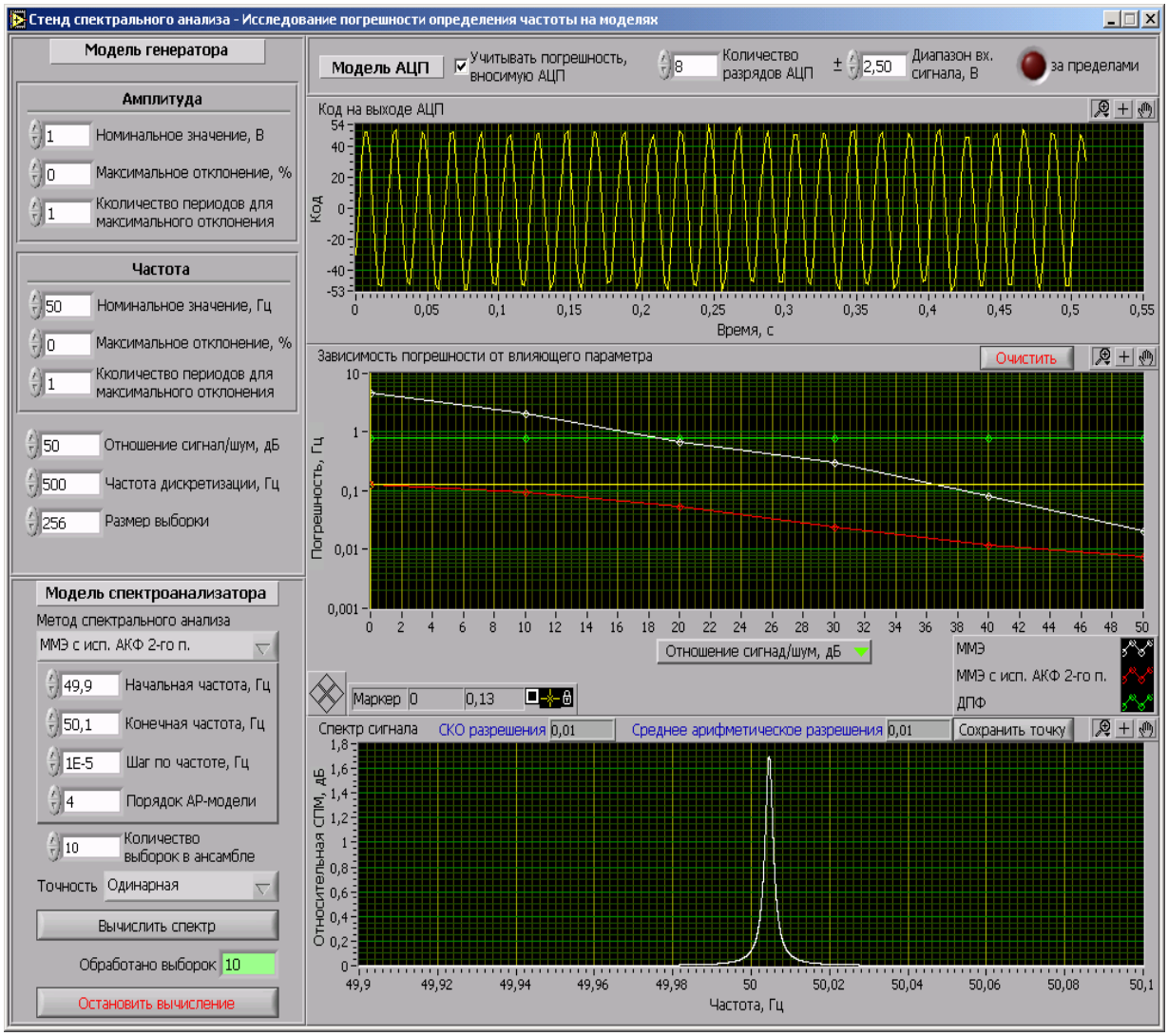

Рисунок 4.6 – Интерфейс пользователя в режиме оценивания частоты

Модель спектроанализатора выполняет вычисление оценки спектральной плотности мощности исследуемым методом и значения погрешности определения частоты [30]. В меню «Метод спектрального анализа» можно выбрать один из четырех методов спектрального анализа. В случае выбора «ММЭ» или «ММЭ с исп. АКФ 2-го п.» появляются поля «Начальная частота, Гц» - для задания значения нижней границы диапазона анализируемых частот, «Конечная частота, Гц» - для задания значения верхней границы диапазона анализируемых частот, «Шаг по частоте, Гц» - для задания шага частотной сетки для этого диапазона, «Порядок АР-модели» - для задания порядка авторегрессионой модели. В поле «Количество выборок в ансамбле» задаётся количество выборок отсчётов исследуемого сигнала, для которых будет вычисляться оценка спектральной плотности мощности выбранным методом, определяться частота, соответствующая максимуму этой оценки, вычисляться погрешность определения частоты. В меню «Точность» производится выбор точности, с которой представляются данные при выполнении вычислительных операций. При нажатии кнопки «Вычислить спектр» выполняется обработка заданного количества выборок. После обработки всех выборок вычисляется среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонение накопленных значений погрешности определения частоты. При обработке каждой выборки отсчётов вычисленной оценки спектральной плотности мощности выводится на график «Спектр сигнала». В поля «СКО погрешности» и «Среднее арифметическое погрешности» выводятся, соответственно, значения среднеквадратического отклонения и среднего арифметического накопленных значений погрешности определения частоты [30].

Данные по анализу частоты спектра и амплитуде сигнала поступают на вход блока сравнения, работающего по принципу сравнения эталонных и полученных значений, на базе нечеткой логики. На выходе блока мы будем иметь значение общего состояния оборудования, вида неисправности и

остаточный ресурс оборудования с рекомендациями по срокам и типу необходимых диагностических и ремонтных работ.

Ведущие производители систем управления электроприводами переменного тока уже сейчас используют анализаторы качества питающего напряжения в качестве стандартного оборудования. К примеру, компания Mitsubishi Electric применяет приборы контроля и анализа гармонического состава питающего напряжения типа ME96NSR (рисунок 4.7), выполненные в формате DIN (евро стандарт приборов), позволяющего производить:

– пассивное наблюдение значений тока и напряжения по каждой фазе;

– спектральный анализ питающего напряжения до 13 гармоники;

– непосредственное подключение к серверам или рабочим станциям;

– непосредственное подключения к сетям Modbus или CC-Link;

– удаленный ввод/вывод для сбора данных о состоянии коммутирующего оборудования и для управления им;

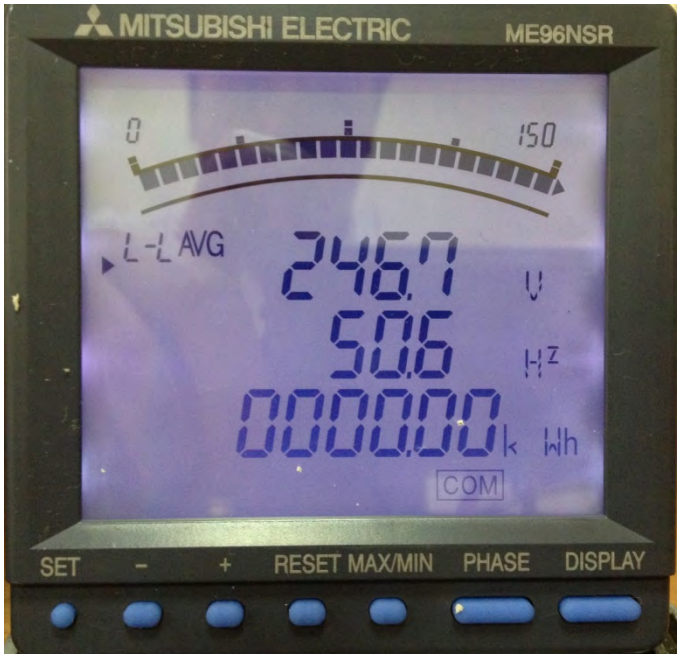

Рисунок 4.7 – Анализатор качества питающего напряжения ME96NSR

– фиксацию пиков (минимумов и максимумов) потребляемого тока и напряжения;

– вычисление активной и реактивной мощности, коэффициента мощности (cos φ), учет потребляемой энергии.

Применение приборов такого типа позволяет отслеживать изменение гармонического состава потребляемого тока и напряжения в течение времени, что позволит сделать вывод о неисправностях электромеханического оборудования и отслеживать их развитие, что является первым шагом к применению систем диагностики ЭМО и определения фактического состояния.

4.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Для аппаратной реализации системы диагностики с применением методов частотного анализа потребляемого тока и напряжения, методов ваттметрографии потребляемой мощности целесообразно применение современных средств сбора и хранения данных с высокой степенью дискретизации входного сигнала с последующей обработкой на персональном компьютере (ПК). ПК может работать стационарно и производить обработку данных в режиме реального времени с автоматическим формированием отчета либо в качестве накопителя информации для последующей экспертной оценки.

2. Реализовать преобразование и анализ частотного спектра тока и напряжения, а также вычисление потерь потребляемой мощности, возможно посредством программного обеспечения на базе программы *LabVIEW*, позволяющего произвести разложение частотного спектра питающего напряжения и потребляемого тока по каждой фазе, а также позволяющего производить автоматическую фиксацию амплитудного значения тока, напряжения и потерь мощности по выбранному частотному диапазону.

5 ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УНИФИЦИРОВАННОГО ПОДХОДА В ПРОЕКТИРОВАНИИ, ОБСЛУЖИВАНИИ И ФОРМИРОВАНИИ ГОРНО–ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Наиболее рациональная модель карьерного самосвала для определенных условий эксплуатации выбирается как при проектировании карьера, так и в процессе эксплуатации по мере изменения параметров карьера и других горно–технических и экономических условий.

Модель самосвала не может выбираться изолированно от других технологических машин, входящих в технологический комплекс, и, прежде всего, от погрузочного средства–экскаватора или ковшового погрузчика. При выборе типажной структуры погрузочно–транспортного оборудования для конкретного карьера, в первую очередь, выбирают тип и модель экскаватора по основному его параметру–вместимости ковша, уже затем выбирают автосамосвал по грузоподъемности, наиболее соответствующей данному экскаватору. Далее следует детальная проверка и обоснование правильности предварительного выбора.

Горнодобывающая промышленность обладает в настоящее время достаточно широким спектром типоразмеров карьерных самосвалов, и этот спектр постоянно расширяется. Наличие такого спектра, с одной стороны, обеспечивает более широкую свободу выбора модели машины, а с другой, усложняет задачу выбора оптимального типа комплекса, так как для одних и тех же условий могут оказаться примерно равноценными несколько типов комплексов. Поэтому необходима более детальная проработка типажа погрузочно–транспортного оборудования с учетом динамики развития карьера и тенденций в развитии рабочих параметров машин.

5.1 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГТК

При выборе рациональной модели карьерного самосвала для конкретных условий эксплуатации в первую очередь необходимо рассматривать основные критерии оценки качества горно–транспортного комплекса, под которыми понимается совокупность погрузочных машин (экскаваторов) и самосвалов, связанных между собой во времени и пространстве. Правильно подобранный комплекс машин обеспечивает максимальную производительность в заданных условиях эксплуатации.

Технологические качества ГТК оцениваются следующими критериями [36]:

1. Объемный модуль комплекса, представляющий собой соотношение вместимости кузова самосвала и вместимости ковша экскаватора:

$$\mu_o = \frac{V}{E}, \tag{5.1}$$

где

V– вместимость кузова самосвала, м^3;

E– геометрическая вместимость ковша экскаватора, м^3.

Численно объемный модуль будет приблизительно равняться числу циклов погрузки самосвала экскаватором. Исходя из мировой практики выбора вместимости ковша экскаватора (E) и грузоподъемности самосвала (V), число циклов экскавации для оптимальной загрузки одного самосвала не должно превышать от 3 до 5 [74].

Данный подход является наиболее рациональным и экономичным при работе ГТК, поскольку позволяет сокращать время простоя экскаватора и самосвалов. Из этого следует, что выбор типа самосвала и экскаватора для определенного вида работ и их связь в комплекс являются первоочередными задачами.

2. Весовой модуль комплекса, представляющий собой соотношение грузоподъемности автосамосвала и расчетной массы породы в ковше экскаватора:

$$\mu_B = \frac{q_a}{q_e}, \tag{5.2}$$

где

q_a– грузоподъемность самосвала [т];

q_e– расчетная масса породы в ковше экскаватора [т].

3. Стабильность функционирования, оцениваемая коэффициентом стабильности:

$$k_{cm} = 1 - \frac{1}{N_{a.e}}, \tag{5.3}$$

где

$N_{a.e}$–число автосамосвалов, обслуживающих один экскаватор.

4. Относительная продолжительность обслуживания автосамосвала экскаватором:

$$\lambda = \frac{t_o}{T_p}, \tag{5.4}$$

где

t_o–время обслуживания самосвала, ч;

T_p–продолжительность рейса самосвала, ч.

Фактор обслуживания отражает долю простоев автосамосвала под погрузкой, включая время маневров и ожидания погрузки в общем времени рейса. При использовании в комплексе самосвалов большей грузоподъемности, но в сочетании с экскаватором той же модели, степень выполнения самосвалом транспортных функций снижается.

В таблице 5.1 приведены рекомендуемые типоразмеры экскаваторно-автомобильных комплексов. Представленное в таблице соответствие между объемом ковша и грузоподъемностью самосвала позволяет обеспечить:

– оптимальное число циклов экскаваций (3÷5) при ведении горных работ;

– возможность совместной диспетчеризации и учета работы и отказов оборудования;

– унифицированный подход к вопросам диагностики и обслуживания горно–транспортных машин.

Таблица 5.1 – Рекомендуемые типоразмеры экскаваторно-автомобильных комплексов

Тип экскаватора	Рекомендуемая грузоподъемность самосвала
ЭКГ-12К, ЭКГ-12М	90-150 т
ЭКГ-18Р/20К, ЭКГ-20М	120-180 т
ЭКГ-32Р, ЭКГ-35К	190-240 т
ЭКГ-40	250-320 т
ЭКГ-50	320-450 т

Вышеперечисленные аспекты доказывают целесообразность установления технологической связи между экскаватором и самосвалом, их объединения в добычной комплекс.

5.2 ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СВЯЗИ САМОСВАЛОВ И ЭКСКАВАТОРОВ В ГОРНО–ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС НА ПРИМЕРЕ ЭКСКАВАТОРА ЭКГ–32Р И САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ

Связь экскаватора и самосвала в добычный комплекс должна производиться с учетом вышеуказанных критериев. Примером горно–транспортного комплекса может служить комплекс на основе экскаватора ЭКГ 32Р и самосвала БелАЗ грузоподъемностью от 190 до 240 т. Вместимость сменных ковшей экскаватора ЭКГ 32Р составляет 26, 35 и 42 м^3 (таблица 5.2). В ковше экскаватора может находиться до 63 тонн породы. Исходя из этого, выбирается используемый тип ковша и грузоподъемность самосвала, обслуживающего экскаватор.

Таблица 5.2 – Вместимость основного и сменных ковшей экскаваторов ЭКГ 32Р

Вместимость ковша	**Категория пород по ЕНВ**	**Горные породы**
20-26 м^3	Тяжёлые и весьма тяжёлые (IV-V категории)	Железистые кварциты, медно-никелевые и свинцово-цинковые руды, габбродиабазы и пр.
35 м^3	Средние и тяжёлые (III-IV категории)	Кристаллические сланцы, окисленные железные руды, аргиллиты, известняки и пр.
40-50 м^3	Лёгкие (I-II категории)	Угли, алевролиты, суглинки, глины, песчано-гравийные породы и пр.

Для примера расчета по основным критериям (оптимальному числу циклов экскавации самосвала и весовому модулю) выберем вариант с самосвалом грузоподъемностью 220 т и вместимостью ковша экскаватора 35 м^3 (с максимальным весом породы в ковше до 63 т). В этом случае число циклов экскавации будет численно равно весовому модулю:

$$\mu_B = n = \frac{q_a}{q_e} = \frac{220}{63} = 3{,}49, \qquad (5.5)$$

где

n–число циклов экскавации;

q_a– грузоподъемность самосвала; т

q_e– масса породы в ковше экскаватора, т.

Получившееся значение циклов экскавации 3,49 подразумевает полную загрузку ковша экскаватора, что случается далеко не всегда и зависит от горных условий, разрыхления грунта и квалификации машиниста. Полученное соотношение обеспечивает загрузку самосвала за 4 цикла экскавации (в худшем случае за 5), что попадает в заданный диапазон и является оптимальным с точки зрения построения рабочего процесса.

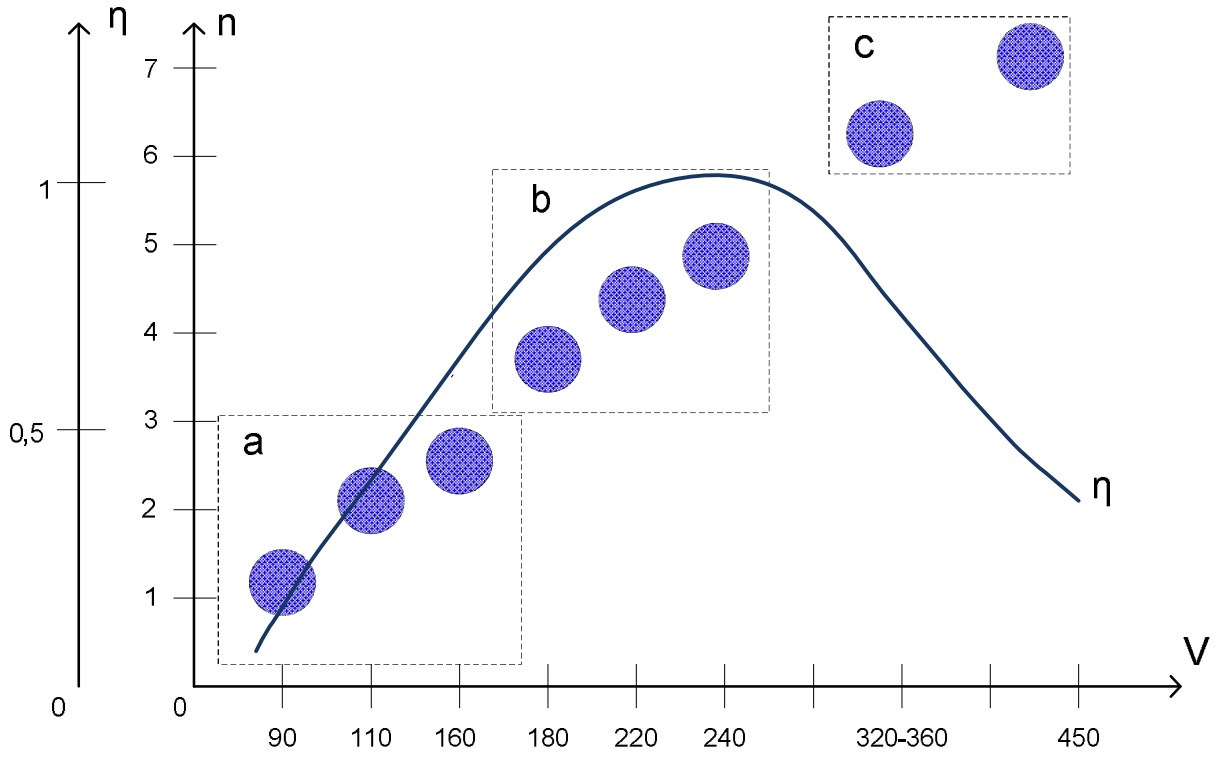

Рисунок 5.1 – График эффективности работы комплекса при использовании различных типов самосвалов БелАЗ в паре с экскаватором ЭКГ–32Р

а – зона наименьшей эффективности использования с точки зрения времени простоя экскаватора; б – зона наивысшей эффективности использования комплекса; в – зона наименьшей эффективности использования с точки зрения эффективного использования самосвалов.

На рисунке 5.1 представлен график эффективности использования комплекса на примере связи экскаватора ЭКГ–32Р и различных по грузоподъемности самосвалов производства завода БелАЗ. Зоны на графике показывают степень эффективности использования ГТК. В зоне «а» показана наименьшая эффективность с точки зрения использования экскаватора по производительности в паре с самосвалами грузоподъемностью от 90 до 160 тонн. Исходя из того, что максимальная грузоподъемность ковша экскаватора ЭКГ–32Р составляет приблизительно 63 тонны, число циклов экскавации в таком комплексе будет от 1,5 до 3, что является крайне неэффективным показателем. Таким самосвалам больше подойдут модели экскаваторов от ЭКГ–12 до ЭКГ–20 с вместимостью ковша от 30 до 50 тонн.

В зоне «в» показана наименьшая производительность с точки зрения использования самосвалов. Время простоя самосвала здесь будет наибольшим, поскольку число циклов экскавации будет в диапазоне от 6 до 9 (при условии, что ковш будет загружен полностью), что является также неэффективным показателем. Таким самосвалам больше подойдет комплекс с экскаваторами ЭКГ– 40 и ЭКГ–50 с максимальным весом в ковше от 85 до 110 тонн, проектируемыми на «ИЗ–КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова». На графике (рисунок 5.2) также показана кривая эффективности использования, отражающая вышеуказанные показатели.

Наибольшей эффективностью обладают комплексы, попадающие в зону «б», поскольку здесь обеспечиваются наилучшие показатели по производительности и времени простоя. Число циклов экскавации в таком комплексе попадает в рекомендуемый диапазон от 3 до 5 циклов. В зону «б» входят самосвалы грузоподъемностью от 180 до 240 тонн. Позитивным примером реализации этой стратегии является связь первого экскаватора ЭКГ–32Р и самосвала БелАЗ 7530 грузоподъемностью 220 тонн на разрезе «Краснобродский» ОАО «Кузбассразрезуголь» (рисунок 5.2)

Рисунок 5.2 – Экскаватор ЭКГ–32Р и самосвал БелАз грузоподъемностью 220 т. (февраль 2013, разрез Краснобродский, Кемеровская область)

Число циклов погрузки для данного комплекса составляет от 4 до 5, что дает значительный эксплуатационный эффект. В совокупности с применением электропривода переменного тока основных механизмов экскаватора средний удельный расход электроэнергии экскаватора находится в пределе 0,3–0,32 кВт·ч/м3 (по данным ОАО «УК «Кузбассразрезуголь и ООО «ОМЗ–Сибирь–Сервис»), что лучше показателей конкурентов. Среднемесячная производительность экскаватора ЭКГ- 32Р достигает 700–800 тыс. м3 при характерном для условий ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» уровне организации горных работ. В январе текущего года была достигнута наибольшая суточная производительность – 29400 $м^3$ массы горных пород. В общем за весь период испытания и последующей эксплуатации (с апреля 2012 года) экскаватором было добыто более 4 млн.т массы горной породы. Среднемесячный коэффициент технической готовности этого экскаватора достигает значения 0,89 [67].

Показатели эффективности работы горно–транспортного комплекса

Показателями эффективности работы горно–транспортного комплекса могут быть техническая и эксплуатационная производительность. Под технической производительностью (ТП) ГТК подразумевается максимальная производительность для конкретного данного комплекса при его непрерывной работе в условиях забоя за единицу времени. При расчете технической производительности комплекса должны быть учтены конкретные условия работы: категории пород, разрыхление породы и наполнение ковша при непрерывной работе, а также перерывы в работе конкретного горно–транспортного комплекса (длина пути от экскаватора до пункта выгрузки, оснащенность парком самосвалов, передвижение экскаватора в забое).

Техническая производительность комплекса за определенную единицу времени (обычно за час) может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\text{ТПК} = 60 \cdot E \cdot n \cdot \text{К}_\text{н}/(\text{К}_\text{р} + \text{К}_\text{п}) \text{ , (м}^3 \text{ / ч) ,} \qquad (5.6)$$

где

E – геометрическая вместимость ковша, м^3;

n – число циклов в единицу времени при расчетных условиях

$$n = 60/(t_\text{ц} + t_\text{см}),$$

где

$t_{см}$ – время смены самосвала под загрузкой, с;

$t_ц$ – продолжительность одного цикла, с.

$$t_\text{ц} = t_\text{к} + t_\text{пв} + t_\text{пз} \text{ ,}$$

где

$t_к$ – продолжительность копания, с.;

$t_{пв}$– продолжительность поворота на выгрузку, с;

$t_{пз}$– продолжительность поворота в забой, с;

$К_н$ – коэффициент наполнения ковша;

$К_р$ – коэффициент разрыхления грунта;

$К_п$ – коэффициент подготовки забоя.

Все величины, вошедшие в формулу, кроме геометрической вместимости ковша экскаватора, – переменные, зависящие от грунтовых условий, квалификации водителей самосвалов и машинистов экскаваторов, формы забоя и т.д. Коэффициент подготовки забоя может зависеть от качества забоя, его высоты, освещенности, условий подхода транспорта к месту загрузки.

Сравнивая техническую производительность комплекса, рассчитанную для конкретного типа добываемой породы, можно сделать вывод о том, какое сочетание машин в горно–транспортном комплексе и количество самосвалов, обслуживающих экскаватор, будет оптимальным для конкретных условий забоя.

Под эксплуатационной производительностью комплекса следует понимать действительный объем горной массы, отработанный комплексом за обозначенный период эксплуатации. Этот показатель может быть рассчитан путем сложения всех технологических простоев комплекса. К таким простоям относятся потери времени на осмотр экскаватора и самосвалов, на формирование списка подвижного состава для обслуживания забоя, на планово–предупредительные ремонты, на диагностику оборудования, на замену запчастей, на устранение аварийных ситуаций и т.д.

$$ЭПК = 60 \cdot E \cdot n \cdot К_н \cdot К_в/К_р, \text{ (м}^3 \text{ / ч)}, \quad (5.7)$$

где

$К_в$–коэффициент использования рабочего времени комплекса, представляющий отношение времени чистой работы ко всему затраченному;

$$К_в = t_{чр}/(t_ц + t_{см} + t_{разг} + t_{дор} + t_{тех} + t_н + t_{ав} + t_{рем} + t_{обс} + t_{диаг}),$$

где

$t_{чр}$–время чистой работы;

$t_{разг}$– время разгрузки самосвала на пункте разгрузки;

$t_{дор}$ – время движения самосвала до забоя;

$t_{тех}$ – временные издержки, зависящие от технологического процесса;

$t_н$ – временные издержки, которые не могут быть учтены;

$t_{ав}$– время, затраченное в результате аварии;

$t_{рем}$– время, затраченное на ремонт и доставку запчастей;

$t_{обс}$– время, затраченное на текущее обслуживание оборудования, проведение планово–предупредительных ремонтов, доставку расходных материалов;

$t_{диаг}$– время, затраченное на диагностику оборудования.

Время $t_{дор}$ является переменной величиной и зависит от расстояния от места выгрузки до забоя, дорожных и погодных условий, квалификации водителя. Под временем $t_{тех}$ понимается время, затрачиваемое на обеденные перерывы, пересменок водителей самосвалов, а также время, затраченное на подготовку забоя к работе (работа бульдозеров), время дозаправки самосвалов и т.д. Время, затрачиваемое на проведение планово–предупредительных ремонтов, и время доставки запчастей до станций обслуживания (в случае с самосвалом) и непосредственно к экскаватору занимают значительную часть всего времени работы в карьере и оказывают серьезное влияние на снижение эксплуатационной производительности.

Нивелировать воздействие данных временных издержек возможно посредствам перехода от практики применения планово–предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию с применением современных средств диагностики остаточного ресурса и планирования текущих и капитальных ремонтов.

5.3 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЭМО ГОРНО–ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Показатели сравнительной экономической эффективности капитальных вложений на установку системы по различным рассматриваемым вариантам могут быть оценены по трем параметрам [30].

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений:

$$T_{\text{ок.с}} = \frac{\text{K}_2 - \text{K}_1}{\text{C}_1 - \text{C}_2}, \tag{5.8}$$

где

$T_{ок.с.}$ – срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, определяемый экономией на себестоимости;

K_1 и K_2 – капитальные вложения по вариантам объекта, оборудованного системой мониторинга и не оборудованного системой технической диагностики (при расчете учитывается финансовый ущерб при возможной аварийности);

C_1 и C_2 – себестоимость годовой продукции по сравниваемым вариантам.

Значение $T_{\text{ок.с}}$ сравнивается с нормативным значением $T_{\text{ок.с.н}}$, принятым на предприятии. Если $T_{\text{ок.с}} < T_{\text{ок.с.н}}$, то дополнительные капитальные вложения эффективны.

Сравнительная эффективность капитальных вложений [30].:

$$E_{\text{с}} = \frac{\text{C}_1 - \text{C}_2}{\text{K}_2 - \text{K}_1} \tag{5.9}$$

Полученное значение $E_{\text{с}}$ сравнивается с нормативным E (норматив сравнительной эффективности капитальных вложений, принятый на предприятии). Если $E_{\text{с}} > E$, то дополнительные капитальные вложения эффективны.

При наличии нескольких равноценных вариантов наиболее эффективный вариант выбирается по минимуму приведенных затрат [30]:

$$З_i = С_i + EК_i = \min , \qquad (5.10)$$

где

$З_i$ – приведенные затраты по каждому варианту;

C_i – текущие затраты (себестоимость) по тому же варианту;

K_i – капитальные вложения по тому же варианту;

E – норматив эффективности капитальных вложений.

5.4 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Основными эффективными методами решения задач отраслевого развития и управления являются производство и внедрение новой высокоэффективной техники, создание и внедрение в производство эффективных технологических комплексов, рационализация производства, обеспечение типизации технологий, унификации комплексов, а также эффективная организация работ основных и обслуживающих производств.

Среди большого числа технических характеристик производства промышленной продукции наиболее существенное влияние на суммарные затраты производства оказывают характеристики рационализации структуры добычных комплексов, надежности оборудования и своевременности ремонтов (безотказность, долговечность, ремонтопригодность), а также состав номенклатуры технических комплексов и их составных частей, характеризуемый показателями унификации. При этом между рационализацией, в частности, в области создания горно-транспортных комплексов, унификацией структуры оборудования, надежностью и безотказностью наблюдается устойчивая взаимная связь.

Оборудование с высоким уровнем унификации оказывается более надежными и обладает более низкой стоимостью благодаря повышению серийности производства, которая позволяет удешевить процесс производства, сократить время на его подготовку.

Следует отметить, что технико-экономический эффект от обеспечения рационализации производства (связь экскаватора и самосвала в ГТК), высокого уровня надежности и безотказности, унификации оборудования должен рассматриваться в течение продолжительного периода времени, так как такой эффект проявляется во многих сферах.

Так, эффект может возникать на всех стадиях жизненного цикла техники, включая разработку и проектирование, серийное производство, эксплуатацию. В частности, на этапе проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР), на этапе подготовки и запуска серийного производства, а также на всех стадиях эксплуатации объектов, включая основное производство (использование оборудования по его прямому назначения), техническое обслуживание, диагностику, снабжение, планово-предупредительный и внеплановый ремонт, текущий и капитальный ремонт и т.д.

Кроме того, такие мероприятия оказывают прямое влияние на расходование материальных, энергетических, финансовых, трудовых ресурсов как на стадии проектирования и производства оборудования, так и на стадии его эксплуатации на промышленных предприятиях. Вышеперечисленные эффекты можно оценить обобщающим показателем - уровнем снижения полной стоимости разработки, производства и эксплуатации оборудования, который должен быть рассчитан для каждого отдельного предприятия индивидуально. При внедрении предложенных в диссертационном исследовании мероприятий возникают два основных вида эффекта, классифицированных по источнику их возникновения:

1. Технико-экономический эффект для предприятия-потребителя оборудования (при эксплуатации на горных предприятиях).
2. Технико-экономический эффект для предприятия-производителя оборудования.

Оценка технико-экономического эффекта от предложенных мероприятий для предприятия-потребителя

Классификация технико-экономических эффектов, возникающих на горных предприятиях–потребителях, представлена на рисунке 5.3

Рисунок 5.3 – Структура предложенных мероприятий повышения эффективности на предприятии–потребителе

Основным инструментом современного анализа для экономической оценки технических и организационных решений служат метод дисконтированного потока денежных средств и классические общепринятые показатели оценки эффективности инвестиций, предложенные для применения «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов» [47].

Важнейшим показателем эффективности инвестиционных проектов является чистый дисконтированный доход (net present value) – ЧДД (NPV), который имеет вид:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{B_t - K_t - Э_{прt} - H_t + Ам_t}{(1+r)^t} \ , \qquad (5.11)$$

где

A – сумма дисконтированных доходов (положительных денежных потоков);

Q – дисконтированная сумма инвестиций (отрицательных денежных потоков);

r – ставка дисконта, принятая для оценки инвестиционного проекта;

T – продолжительность инвестиционного периода;

Bt – выручка от реализации в году t;

Kt – капитальные вложения в году t;

Эпрt – эксплуатационные затраты в году t без амортизационных отчислений и налогов;

Ht – налоговые выплаты в году t;

Амt – амортизационные отчисления в году t.

Показатель ЧДД широко применяется для оценки проектов с фиксированным сроком начала и завершения и является наиболее подходящим критерием оценки технических, организационных и других мероприятий в текущей деятельности предприятия.

Ключевые факторы, определяющие его величину, - это денежные потоки и норма дисконта (ставка дисконта *r*). ЧДД представляет собой алгебраическую сумму выгод и издержек проекта, дисконтированных по справедливой ставке дисконта.

В общем случае проект принимается при NPV>0, *opt=max*. То есть критерием принятия проекта является положительное значение ЧДД.

Для расчета ЧДД по предложенным в диссертационном исследовании мероприятиям следует использовать соотношение 5.12.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T} \frac{\left(Э_{\text{экс t}} + Э_{\text{труд t}} + Э_{\text{ГТК t}} + Э_{\text{прост t}} + Э_{\text{кап t}} + Э_{\text{хран t}} + A_t\right)}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{T} \frac{(K_t + З_{\text{НИОКР t}} + З_{\text{обуч t}} + Н_{\text{пр t}})}{(1+r)^t}, \quad (5.12)$$

где

$Э_{\text{экс}\,t}$ – экономия затрат на эксплуатацию, экспертизу, техобслуживание, диагностирование и ремонт электромеханического оборудования в t-м году, тыс. руб.

$Э_{\text{труд t}}$ – экономия затрат на обучение персонала (бригады наладчиков) и экономия затрат на оплату труда с выплатами социального характера, спецпитанием и спецодеждой в t-м году, тыс. руб.;

$Э_{\text{ГТК t}}$ – экономия затрат за счет эффективной работы ГТК (сокращение времени простоя самосвала под загрузкой экскаватора, снижение энергопотребления экскаватора, снижение затрат на топливо) в t-м году, тыс. руб.;

$Э_{\text{прост t}}$ – экономия затрат за счет снижения простоев оборудования (сокращение времени простоя на проведение ППР, предотвращение внезапных выходов из строя оборудования, своевременная замена вышедшего из строя оборудования) в t-м году, тыс. руб.;

$Э_{\text{кап t}}$ – экономия на капитальных вложениях в t-м году, тыс. руб.;

$Э_{хран\,t}$ – экономия затрат на хранение запасных частей на горном предприятии в t-м году, тыс. руб.;

At – амортизация в t-м году, тыс. руб.;

$К_t$ – капитальные вложения (закупка экскаваторов, самосвалов, оборудования для диагностики остаточного ресурса и др.) на осуществление инвестиционного проекта (предложенных мероприятий) в t-м году, тыс. руб.;

$З_{НИОКР\,t}$ – затраты на проведение НИР и ОКР при разработке и внедрении предложенных мероприятий в t-м году, тыс. руб.;

$З_{обуч\,t}$ – затраты на обучение персонала при внедрении предложенных мероприятий в t-м году, тыс. руб.;

$Н_{пр\,t}$ – увеличение налога на прибыль в t-м году, тыс. руб.;

r – ставка дисконта;

t – год реализации проекта.

Основной экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий достигается путем перехода на систему обслуживания и прогнозирования остаточного ресурса оборудования по его фактическому состоянию и путем рационализации процесса добычи со снижением времени простоя оборудования.

Оценка технико-экономического эффекта от предложенных мероприятий для предприятия-производителя

Классификация технико-экономических эффектов, возникающих на предприятиях–производителях, представлена на рисунке 5.4.

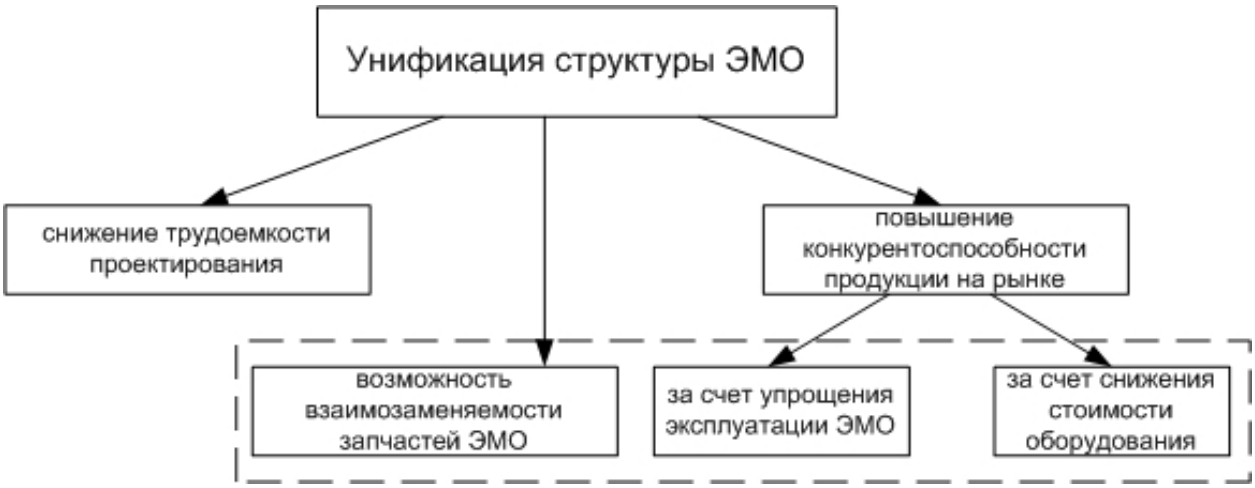

Рисунок 5.4 – Структура экономических эффектов, возникающих на предприятии–производителе

В данном случае, основной экономический эффект для предприятия-производителя оборудования от внедрения предложенных мероприятий достигается за счет унификации структуры ЭМО, а именно, за счет снижения затрат на проектирование и серийное производство оборудования.

Достигаемое при унификации структуры ЭМО повышение серийности его изготовления создает возможности для эффективного функционирования специализированного производства, более глубокой его автоматизации, а также возможности для повышения производительности труда, повышения качества и снижения себестоимости изготовляемой продукции и, как следствие, повышения устойчивости производства и конкурентоспособности продукции на рынке.

Конкурентоспособная продукция обладает какими-либо конкурентными преимуществами. В данном случае, это более низкие издержки, которые отражают способность предприятия разрабатывать, выпускать и продавать сравнимую продукцию с меньшими затратами, чем конкуренты. Таким образом, под конкурентоспособностью понимают характеристику продукции, отражающую ее отличие от товара – конкурента по степени соответствия конкурентной общественной потребности и по затратам на ее удовлетворение.

Для определения конкурентоспособности продукции используются различные маркетинговые и квалиметрические методы, в основе большинства которых лежит нахождение соотношения «цена-качество». Наиболее конкурентоспособна продукция, имеющая оптимальное соотношение этих характеристик. [16]:

$$К_Т = К / Ц , \quad (5.13)$$

где

$К_Т$ – показатель конкурентоспособности продукции на рынке;

$К$ – показатель качества (удобства) продукции;

$Ц$ – показатель цены товара.

В рассматриваемом случае более низкая стоимость оборудования на рынке достигается за счет снижения затрат на его проектирование и производство. Более высокий показатель качества и удобства продукции для потребителя обеспечивается за счет упрощения эксплуатации ЭМО на горном предприятии и возможности взаимозаменяемости запчастей ЭМО.

Так, чем ниже стоимость оборудования на рынке и чем выше показатель качества и удобства оборудования для потребителя, тем выше его конкурентоспособность. В результате внедрения предложенных мероприятий конкурентоспособность оборудования на рынке увеличится. Общий экономический эффект для предприятия-производителя определяется по формуле:

$$Э = З_{проект} + З_{произ} \quad (5.16)$$

где

$З_{проект}$ – снижение затрат на проектирование оборудования, тыс. руб.;

$З_{произ}$ – снижение затрат на серийное производство оборудования, тыс. руб.

На стадии проектирования и производства оборудования, сокращение номенклатуры образцов вида техники и унификация их агрегатов, модулей, составных частей, повышение серийности изготовления приводят к изменению как стоимостных, так и временных характеристик в лучшую сторону. Рациональная унификация позволяет обеспечить высокую функциональную и эксплуатационную совместимость изделий, что упрощает проектирование и производство, удешевляет снабжение и укомплектование, снижает расходы предприятия-производителя.

Таким образом, из закономерности уменьшения себестоимости продукции за счет увеличения объема выпуска, однородности продукции и увеличения срока ее нахождения в серийном производстве следуют важные выводы для экономического управления предприятием. Так, небольшие объемы выпуска оборудования, дифференциация продукции и малый срок нахождения оборудования в серийном производстве, в большинстве случаев, невыгоден предприятию. Предприятие должно стремиться к реализации мероприятий по увеличению объема выпуска однородной продукции и увеличению срока ее нахождения в серийном производстве.

В конечном счете, обеспечение длительного нахождения продукции в серийном производстве за счет достижения высокого технического уровня, качества, модернизации, рациональной унификации экономически выгодно как производителю продукции, так и ее потребителю.

5.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Предложенные мероприятия по модернизации системы обслуживания и унификации состава электромеханического оборудования ГТК позволят добиться снижения затрат как на заводе–изготовителе (за счет снижения затрат на проектирование и производство экскаваторов и самосвалов), так и на горнодобывающем предприятии (за счет снижения затрат на обслуживание карьерной техники).

2. Предложенные мероприятия по формированию структуры горно–транспортных комплексов позволят сократить время простоя оборудования и увеличить объем добычи горной массы, что, в конечном счете, повлечет снижение эксплуатационных затрат горнодобывающего предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на базе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная задача повышения эксплуатационный эффективности горно–транспортных комплексов путем совершенствования алгоритмов управления электроприводом переменного тока и системы технического обслуживания электромеханического оборудования горно–транспортного комплекса посредством реализации системы непрерывной диагностики с применением методов спектрального анализа.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен сопоставительный анализ существующих горно–транспортных комплексов и организации их работы на предприятии.

2. Обоснована целесообразность сопоставления грузоподъемности самосвала и объема ковша экскаватора по принципу обеспечения оптимального числа циклов экскавации.

3. Проведено математическое моделирование ЭП переменного тока экскаватора и самосвала, получены диаграммы работы каждого ЭП в номинальных режимах и в режимах работы с перегрузкой. На основе сопоставления диаграмм сделан вывод о возможности применения алгоритма прямого управления моментом с обеспечением максимального быстродействия в контуре тока (момента) при управлении ЭП экскаватора и мотор–колес самосвала.

4. Выполнен анализ существующих методов диагностики повреждений, оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса электромеханического оборудования ГТК.

5. Разработаны рекомендации по подходу к обслуживанию электромеханического оборудования ГТК.

6. Разработан алгоритм оценки состояния ЭМО по электрическим параметрам питающего двигатель напряжения с применением базы данных повреждений на основе нечеткого вывода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, О.В. Теория и практика моделирования сложных систем / О.В. Афанасьев, Е.С. Голик, Д.А. Первухин.; СЗТУ. СПб, 2005 г.– 123 с.

2. Баширов, М. Г. Исследование взаимосвязи параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем, с характерными повреждениями электропривода / М.Г.Баширов, И.В. Прахов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: матер. Всерос. науч.технич. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009 г. – Том 2. – С. 84-86.

3. Белов, М.П., Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации / М.П. Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козярук, Л.П. Козлова, В.А. Новиков, С.В. Савва, и д.р.,– М: изд. “Академия” 2006 г.–368с.

4. Браммер, К. Фильтр Калмана-Бюси.: Пер. с нем. / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982 г. – 200 с.

5. Вейнберг, К.Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: автореферат дис….доктора.тех.наук: 05.09.01 / Вейнберг Конрад Бенонович. – М.: 2012 г.–58 с.

6. Вейнгер, А.М. Электроприводы переменного тока: конспект лекций / А.М. Вейнгер.–М: 2009 г.–20 с.

7. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек.– Л.: Энергия, 1978 г. – 832 с.

8. Воробьев, В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004 г. – 56 с.

9. Герман–Галкин, С.Г., Кардонов Г.А. Электроческие машины: лабораторные на ПК / С.Г. Герман–Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: Корона–принт, 2003 г.– 256 с.

10. Гилл, Ф. Практическая оптимизация: Пер. с англ. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт / – М.: Мир, 1985 г. – 509 с.

11. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 20911-75; введ. 1989 – 12 – 26. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 13 с.

12. ГОСТ Р 27.002–2009 Надежность в технике. Термины и определения / М.: Стандартинформ, 2011.28 с.

13. ГОСТ Р 27.004–2009 Надежность в технике. модели отказов / М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.

14. ГОСТ13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М: Изд-во стандартов, 1997 г.

15. Грунтович, Н.В. Комплексное техническое диагностирование электротехнического оборудования – основа системы ремонтов “по состоянию”/ Н.В. Грунтович, Н.И. Грачек // Горный журнал–2003г.– №7 – С. 67 – 69.

16. Гурен, М.М. Ценообразование и цены на продукцию горных предприятий: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГУ, 2003 г.– 323 с.

17. Давыдов, В.М. Диагностика, как неотъемлемая часть ремонта оборудования по техническому состоянию / В.М. Давыдов, Р.В. Жуков // Безопасность труда в промышленности. – 2002 г. – № 3. – С. 12–14.

18. Диагностика оборудования компрессорных станций: монография серии «Научные труды к 45–летию ОАО «Гипрогазцентр» / Пужайло А.Ф., Савченко С.В., Крюков О.В. и др., под ред. О.В. Крюкова. – Нижний Новгород: Исток, Т2., 2013 г. – 300 с.

19. Емельянов, А.П. Алгоритмы управления, моделирование и анализ высокодинамичных асинхронных электроприводов / А.П. Емельянов, А.Е. Козярук // Электротехника 2011 г.– №2.–С 2–9.

20. Емельянов, А.П. Пронин, М. В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение): учебное пособие / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов – СПб: Изд.”Силовые машины”, 2004 г.–256с.

21. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений / Л. Заде. Пер. с англ. Н.И. Ринго. Под ред. Н.Н. Моисеева и С.А. Орловского. - М.: Мир, 1976 г. – 165 с.

22. Закревский, А.Д. Параллельные алгоритмы логического управления / А.Д. Закревский. – М: изд. “URSS” 2011 г.– 200с.

23. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. Учебное пособие для студентов ВУЗов / под общей редакцией В.А.Новикова, Л.М. Чернигова.– М.: «Академия», 2006 г.–368с.

24. Казарез, А.Н. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией / А.Н. Казрез, А.А. Кулешов.–М.: Недра, 1988 г.–264 с.

25. Карпа, В.М. Оценка частоты гармонического сигнала и амплитуд гармонического сигнала в шуме через спектральную оценку по методу максимальной энтропии. / В.М. Карпа, В.Д. Циделко // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах, № 2, 2003 г.– С.101-107.

26. Ключев, В.И. Теория электропривода: учебник / В.И. Ключев.– М.: Энергоатомиздат, 1985 г. – 721 с.

27. Ковчин, С.А. Теория электропривод / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб: изд., “Энергоатомиздат”, 2000 г.–496 с.

28. Козярук, А. Е., Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства. Учебное пособие / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков. – СПб.: СПГГУ, 2008 г. – 99 с.

29. Козярук, А. Е., Кулыгин, А. В. Технико–экономические показатели ЭЭС горных машин при использовании преобразователей

частоты с активными выпрямителями. / А.Е. Козярук, Кулыгин А.В. – СПб., «Электросила», № 42, 2003 г.

30. Козярук, А.Е. Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов / А.Е. Козярук, А.В. Кривенко, Ю.Л. Жуковский, С.В. Бабурин, М.С. Черемушкина, А.А. Коржев. СПб.:, Горный университет, 2013 г.–90 с.

31. Козярук, А.Е. Применение унифицированной системы управления электроприводами самосвала и экскаватора и способы ее диагностики / А.Е. Козярук, Таранов С.И. // Журнал «Вестник Ивановского Энергетического университета» г. Иваново – № 1 – 2013 г. – С. 104-108.

32. Козярук, А.Е. Системы управления и диагностики электромеханического оборудования карьерных экскаваторов / А.Е. Козярук // Записки горного института. – том № 192 – 2011 г.– С.100-104

33. Коломийцов, М. Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов / Коломийцов, М. Д. /ЛГИ. Л., 1986 г.– 96 с.

34. Копылов, И.П. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электролмех. спец. вузов/ В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович; под ред. И.П. Копылова - М.: Высш. шк., 1988 г. - 328 с.

35. Костерев, Н.В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации / Н.В. Костерев, Е.И. Бардик // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Частина 3. Київ – 2006 г. – С. 39-43.

36. Кулешов, А.А. Карьерный автотранспорт на современном этапе развития: монография / А.А. Кулешов, Ю.А. Плютов.– Красноярск: КИЦМ, 1994 г. – 88 с.

37. Кулешов, А.А. Расчет железнодорожного и автомобильного карьерного транспорта с помощью ЭВМ: учебное пособие / А.А. Кулешов, С.Н. Резников.– Ленинград: ЛГИ, 1986 г. – 45с.

38. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебное пособие / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005 г. – 512 с.

39. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов.– М: Изд.: Энергоатомиздат, 2006 г .– 320 с.

40. Лотоцкий, К.В. Электрические машины и основы электропривода: учебник для сельскохозяйственных техникумов / К.В. Лотоцкий. – М.: Колос, 1964 г. – 495 с.

41. Лукьянов, С.И. Диагностирование электропривода отводящего стана горячей прокатки: монография / С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын, Р.С. Пишнограев. – г. Магнитогорск изд., ГОУ ВПО “МГТУ”, 2008 г. – 240 с.

42. Лукьянов, С.И. Диагностирование электропривода тянуше – правильного устройства МНЛЗ: монография / С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын, Р.С. Пишнограев.– Магнитогорск: МГТУ, 2005 г. – 150с.

43. Лунник, В.Ю. Сравнительный анализ технико-экономических показателей работы отечественных и зарубежных очистных комплексов / В.Ю. Лунник // журнал “Горное электрооборудование и электромеханика”– № 1– 2012 г.– С. 17-23.

44. Ляхомский, А.В. Повышение эффективности функционирования электротехнических систем карьерных экскаваторов / А.В. Ляхомский, В.Н. Фашиленко, С.В. Павленко.– Старый Оскол: ТНТ, 2012 г. – 248 с.

45. Малафеев, С.И. Моделирование энергетических процессов в мехатронных системах одноковшовых экскаваторов / С.И. Малафеев, С.С. Малафеев, Н.А. Серебренников // Журнал «горное оборудование и электромеханика» – №5 – 2011 г. – С.24 – 29.

46. Мариев, П.Л. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке / П.А. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов.– СПб..: Наука, 2006 г. – 387 с.

47. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Третья редакция, исправленная и дополненная. – М. 2008 г. – 234 с.

48. Нурматова, Е.В. Подход к решению задачи классификации технических состояний в нечеткой логической системе / Е.В. Нурматова // Известия ТулГУ. Техническое науки , Вып. 1, 2010 г. С.170–174.

49. Официальный сайт компании Caterpillar [электронный ресурс] URL: https://mining.cat.com/cda/layout?m=434859&x=97&f=519007.

50. Официальный сайт пользователей MathLab и Simulink [электронный ресурс]. URL: http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/18.php

51. Павлов, Б. В. Акустическая диагностика машин. / Б. В. Павлов / М.: Машиностроение, – 1971 г. 22 с.

52. Патент А.с. 1619191 СССР. Способ определения частот и амплитуд гармонических составляющих полигармонического сигнала. / В.М. Карпа, Н.В. Нагаец, В.Д. Циделко. 1990 г. Бюл. № 1.

53. Петряков С.А. Электротехническая система автоматического регулирования толщины полосы широкополосного стана горячей прокатки: автореф. дис….канд.тех.наук.: 05.09.03 / Петряков Сергей Анатольевич.– Магнитогорск, 2013 г. – 20 с.

54. Питкин, А.Н., Бессонов И.В., Мюклих Х. Модернизация электрооборудования шагающего экскаватора ЭШ15.90А / А.Н. Питкин, И.В .Бессонов, Х. Мюклих // Горный журнал – №12. 2003 г. – С. 92 – 94.

55. Поляков, В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер.– Екатеринбург : УрФУ, 2012 г. – 222 с.

56. Попков, В.И. Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов / В.И. Попков / Л.: Судостроение, – 1974 г. 218с.

57. Применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. / Под ред. А.Оппенгейма. – М:., Мир, 1980 г. – 552 с.

58. Разработка научно–технической программы «Карьерная техника » (заключительный): отчет по НИР / Кулешов А.А. – СПГГИ, 2006 г.–144с.

59. Разработка структуры и алгоритмов мониторинга, диагностики и оценки остаточного ресурса оборудования экскаватора ЭКГ 35К : отчет о научно-технической продукции / А.Е. Козярук – СПб: СПГГИ, 2008 г.– 132с.

60. Разработка теоретических, экспериментальных и технологических основ методов и средств диагностирования, прогнозирования физических процессов и оценки остаточного ресурса электрооборудования машин и технических средств, эксплуатируемых в тяжелых условиях(заключительный): отчет по НИР / Козярук А.Е. – С–Пб: СПГГИ, 2010 г.– 165с.

61. Разработка теоретических, экспериментальных и технологических основ методов и средств диагностирования, прогнозирования физических процессов и оценки остаточного ресурса электрооборудования машин и технических средств, эксплуатируемых в тяжелых условиях (промежуточный): отчет по НИР / Козярук А.Е. – С–Пб: СПГГИ, 2010 г.– 142с.

62. Разработка теоретических, экспериментальных и технологических основ методов и средств диагностирования, прогнозирования физических процессов и оценки остаточного ресурса электрооборудования машин и технических средств, эксплуатируемых в тяжелых условиях (промежуточный): отчет по НИР / Козярук А.Е. – С–Пб: СПГГИ, 2009 г.– 106с.

63. Разработка теоретических, экспериментальных и технологических основ методов и средств диагностирования, прогнозирования физических процессов и оценки остаточного ресурса электрооборудования машин и технических средств, эксплуатируемых в тяжелых условиях (промежуточный): отчет по НИР / Козярук А.Е. – С–Пб: СПГГИ, 2011 г.– 115 с.

64. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники / Ю.К. Розанов. – М.: Энергоатомиздат, 1992 г.– 296 с.

65. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау.– М: “Энергоатомиздат”, 1987 г. – 136 с.

66. Сабинин, Ю.А. Основы электропривода / Ю.А. Сабинин, В.П. Андреев.– М: Изд.: Госэнергоиздат, 1963 г. – 772 с.

67. Самолазов, А.В. Практические результаты внедрения экскаваторов ЭКГ–18Р и ЭКГ–32Р производства ООО «ИЗ–КАРТЕКС имени П.Г. Коробкова» на угледобывающих предприятиях России. / А.В. Самолазов, Т.В. Донченко, Д.А. Шибанов // «Уголь», апрель, 2013 г. С.36–38.

68. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев.– М: Изд. “Наука”, 2005 г.– 304с.

69. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник / Г.Г. Соколовский.–М: Изд.: Академия, 2006 г. – 272 с.

70. Стецюра, Г.Г. Сети интеллектуальных датчиков и исполнительных устройств / Г.Г. Стецюра // Датчики и системы, – № 4 – 2004 г. – С.52–64.

71. Таджибаев, А.И. Научные основы систем оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов: дис…доктора тех.наук. / А.И. Таджибаев.– г. Самара 2006 г.–373с.

72. Таджибаев, А.И. Автоматизированные системы распознавания состояний электроустановок / А.И. Таджибаев. – СПб, Энергоатомиздат, СПб отделение, 2001 г. – 176 с.

73. Таранов, С.И. Направления повышения эффективности эксплуатации экскаваторно–автомобильных комплексов на открытых горных работах / А.Е. Козярук, А.В. Самолазов // Журнал «Горное оборудование и электромеханика» – №1 – 2014 г. – С.6 – 11.

74. Таранов, С.И. Тенденции в развитии систем управления и диагностики электромеханического оборудования горно - транспортного комплекса / С.И. Таранов // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ), г. Москва – №5 – 2013 г. – С. 46-47.

75. Таранов, С.И., Козярук, А.Е. Направления повышения эффективности эксплуатации экскаваторно–автомобильных комплексов / С.И. Таранов, А.Е, Козярук, А.В. Самолазов // Горное оборудование и электромеханика 2014 г.– № 1.– С. 6-11.

76. Терехов, В.М. Алгоритмы фаззи–регуляторов в электротехнических системах /В.М. Терехов // Электричество. – 2000 г. – №12. – С. 55-63.

77. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учебник / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: ИЦ «Академия» 2005 г.– 299 с.

78. Технико–экономическое обоснование эффективности применения в горнорудной промышленности большегрузных автосамосвалов БелАЗ грузоподьемностью (240, 320) т. и экспертная оценка технических решений по электромеханическому оборудованию: отчет по НИР / Козярук А.Е. – С–Пб: СПГГИ, 2008 г.– 97с.

79. Трубецкой, К.Н. Современные системы управления горно – транспортными комплексами / К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров.– М: “Наука”, 2007 г. – 312 с.

80. Уралмашзавод. Экскаваторы // [электронный ресурс]. Режим доступа URL: http://www.uralmash.ru/files/excavator_ru.pdf.

81. Федоров, О.В. Топливно–энергетические ресурсы электроэнергетики: учебное пособие / О.В. Федоров, Н.В. Голубцов.– М.: КНОРУС, 2013 г. – 183 с.

82. Федоров, О.В. Частотно–регулируемый электропривод в экономика страны / О.В. Федоров.– М.: ИНФА–М, 2011 г. – 143с.

83. Филиппов, И.Ф. Вопросы охлаждения электрических машин / И.Ф. Филиппов.– М. –Л.: Энергия, 1964 г. – 334 с.

84. Фролов, А.А. Нейронные модели ассоциативной памяти / А.А.Фролов, И.П. Муравьев. – М.: Наука, 1987 г. – 160 с.

85. Хомутов, О.И. Проблема комплексной оценки изменения физико-химических свойств электроизоляционных материалов в реальных условиях эксплуатации электрооборудования/ О.И. Хомутов // Ползуновский вестник – 2002 г.– №1. С. 4-9.

86. Чиликин, М.Г., Сандлер, А.С. Общий курс электропривода: учебник для ВУЗов /М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981 г. – 576 с.

87. Шамаль, М.А. Прогнозирование диагностических параметров электротехнических комплексов главных приводов мощных экскаваторов: автореф. дис…. канд.тех.наук.: 05.09.03/ Шамаль Михаил Александрович. – Екатеринбург, 2013 г. – 20 с.

88. Шамаль, М.А. Прогнозирование диагностических параметров электротехнических комплексов главных приводов мощных экскаваторов: дис….канд.тех.наук.: 05.09.03/ Шамаль Михаил Александрович. – Екатеринбург, 2013 г. – 134 с.

89. Шамаль, М.А. Аппроксимация динамических рядов моделью на основе радиальной базисной сети / М.А. Шамаль, А.Л. Карякин // Известия вузов. Горный журнал – № 6.–2013г. – С. 33-37.

90. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев.– М: Изд. “Машиностроеие”, 1996 г.–276с.

91. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. – 370 с.

92. Щербатов, В.В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В.В. Щербатов, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин // Известия Томского политехнического университета.– Т. 308. № 7 – 2005 г, С. 156-159.

93. Сайт кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем ИТМО [электронный ресурс.] URL: http://ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/konspekt/Text_2/t_2_2_2.htm

94. Энциклопедия Машиностроения. Том IV-24. Горные машины / под общей редакцией Фролова К.В. – М: изд. “Машиностроение”, 2011 г.– 450с.

95. ABB Company, ACS880-01 hardware manual. 3AUA0000078093. – 2013 г. – 223 p.

96. Bellini, A. Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis / A.Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G.B. Kliman // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol.37. P.1248-1255

97. Bennett, S.M., Patton R.J., Rapid prototyping of a sensor fault tolerant traction control system, IEEE Colloquium on Power Electronics, 21 Apr. 1997, pp. 2/1-2/6.

98. Benouzza, A. Benyettou, A. Bendiabdellah An Advance Park’s Vectors Approach for Rotor Cage Diagnosis / A. Benouzza, A.Benyettou // First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004 г. – С. 461 – 464.

99. Chatfield, C. The analysis of time series. An introduction. / C. Chatfield. – 1985 г. – 40с.

100. Cybenko, G. Approximation by superposition of a sigmoidal function. Mathematics of Control, Signals, and Systems / G. Cybenko .– Draper N., Smith H. Applied regression analysis. New York: Willey, In press,1989г. Vol. 2. 693 p.

101. Deken, Ken. Vector Drive Basics / Ken Deken.– Reliance Electric Company Cleveland, Ohio. 2010 г.–15 с.

102. Duhamef, P. Fast Fourier Transforms: A Tutorial Review and a State of the Art / P. Duhamel, M. Vetterli // Signal Processing. 1990. Vol. 19. C.259-299

103. F. Girosi. Regularization Theory and Neural Networks Architectures / F.Girosi, M. Jones, T. Poggio. Neural Computation, Vol.7 – 1995–С. 219-269.

104. Finch, J.W. Controller AC Electrical Drives / J.W. Finch.– Electrical drive group Company. 2007 г.– 20с.

105. Fritzke, B. A growing neural gas networks learns topologies, In Advancesin Neural Information Processing Systems 7, eds. / B. Fritzke, G. Tesauro, D.S. Touretzky, T.K. Leen // MIT Press, Cambridge MA – 1995г. С. 625-632,.

106. Fyfe, Colin. Artificial Neural Networks and Information Theory. / C. Fyfe.– Department of Computing and Information Systems, The University of Paisley – Edition 1.2 – 2000г. С. 129-134.

107. H. Henao, H. Razik, G.A. Capolina Analytical Approach of the Stator Current Frequency Harmonics Computation for Detection of Induction Machine Rotor Faults. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 41, Issue 3, May-June 2005, Page(s):801 – 807.

108. Hamilton, James D. Time series analysis. / James D. Hamilton.– Princeton University Press, New Jersey, 1994г.–345с.

109. Manual NI PCI-6023E // [электронный ресурс]. URL: http://www.ni.com/pdf/products/us/

110. Kölner, Walter. Gearlessly into the Mine// Metalls & Mining [электронный ресурс]. 2008, №2. URL: http://www.industry.usa.siemens.com/verticals/us/en/metals/downloadcenter/custmer_magazine/issue-2-2008/Documents/mm_2_08_low.pdf.

111. Nandi, S. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines-A Review / S. Nandi. H.A. Toliyat // Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. 1999. Vol. 1. P.197-204.

112. P. Bajec, R. Fiser, V. Ambrozic, J. Nastran Detection of Induction Motor Squirrel Cage Asymmetry using Dynamic Torque Spectrum Analysis. SDEMPED 2003, 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003, 24-26 Aug. 2003 Page(s):110 – 114 p.

113. Pöyhönen, S. Independent component analysis of vibrations for fault diagnosis of an induction motor / S. Pöyhönen, P. Jover, H. Hyötyniemi //, IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2003). Cancun, Mexico, 19-21 May 2003, volume 1, стр. 203-208.

114. Prajakta, S.K. Time series Forecasting using Holt-Winter Exponential Smoothing // Kanwal Rekhi School of Information Technology Journal [электронный ресурс]. 2004г. 13 с. URL: http://www.it.iitb.ac.in/~praj/acads/seminar/04329008_ExponentialSmoothing.pdf.

115. Roland, L. Allen, Mills, Duncan W.. Signal analysis: Time, Frequency, Scale and Structure. IEEE Press, vol. 1, 2, 3, 2004.

116. Siemens company. Sinamics S120 6SL3 097-2AP00-0BP6 – Siemens – 1816 с.

117. Stone, G.C. Developing of Automatic, Continuous Partial Discharges Monitoring System of Detect Motor and Generator Partial Discharges / G.C. Stone, B.A. Floyd, S.R. Campbell, H.G. Sedding // Proc. IEEE. IEMDS'97. P.MA2-3Л-MA2-3.3.,27.

118. Takahashi, I, Noguchi, T. A New Quick-Response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Machine / I. Takahashi, T. Noguchi // IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 22, N. 5, Sep./Oct. 1986, pp.820-827.

119. Takahashi, I., Ohmori, Y. High-Performance Direct Torque Control of an Induction Motor; / I. Takahashi, Y. Ohmori //IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 2, March/April 1989, Page 257-264.

120. Unidrive SP User Guide. Issue Number: 12. Part Number: 0471-0000-12 –Emerson – 304 p.