

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»



На правах рукописи

Тихонов Юрий Васильевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ
МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА**

Специальность 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Малафеев Сергей Иванович

Владимир – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ	10
1.1. Современное состояние и перспективы развития мехатронных систем для карьерных экскаваторов.....	10
1.2. Электрооборудование и мехатронные системы современных карьерных экскаваторов	14
1.3. Интеллектуальные системы и перспективы их применения в мехатронных системах карьерных экскаваторов	20
1.4. Современные телекоммуникационные системы в составе мехатронного комплекса горных машин	23
1.5. Задачи и средства диагностики мехатронных систем карьерных экскаваторов	28
1.6. Выводы и постановка задачи исследований	30
2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ, МОДЕЛЕЙ И КОМПОНЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА.....	33
2.1. Структура мехатронного комплекса карьерного экскаватора	33
2.2. Функции интеллектуального мехатронного комплекса карьерного экскаватора	35
2.3. Разработка архитектуры интеллектуальной информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора	38
2.4. Математические модели компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора.....	44
2.5. Выводы.....	57
3. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО - АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА «ЭЛЕКТРОННЫЙ МАШИНИСТ»	59
3.1. Функциональная организация системы «Электронный машинист»	59
3.2. Аппаратная платформа системы	61

3.3. Оценка эффективности работы мехатронного комплекса карьерного экскаватора	64
3.4. Оценка состояния компонентов мехатронного комплекса	71
3.5. Оценка ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора	73
3.6. Локальные информационно - диагностические модули мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора	75
3.7. Предоставление данных, хранящихся в ИДС, конечным пользователям.....	91
3.8. Моделирование контрольно-диагностических функций системы «Электронный машинист».....	96
3.9. Выводы.....	106
4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА	108
4.1. Аппаратная реализация информационной системы мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора	108
4.2. Разработка интеллектуального информационно - аналитического программного обеспечения для работы с архивными данными	114
4.3. Разработка программного обеспечения оперативного информирования персонала	121
4.4. Разработка информационно - аналитического ПО для работы с ИДС «Пульсар-7».....	126
4.5. Выводы.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	136
ЛИТЕРАТУРА.....	137
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	150
Приложение 1. Документы об участии в конкурсах	150
Приложение 2. Документы об использовании результатов диссертационной работы	152
Приложение 3. Листинг программного обеспечения для определения активного и реактивного сопротивлений ЭЛ	153
Приложение 4. Листинг программного обеспечения DAT-Reader	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Добыча полезных ископаемых – приоритетная отрасль российской промышленности, являющаяся основой стабильности экономики страны. Развитие отрасли происходит под влиянием практических потребностей и совершенствования технологий.

Для эффективного освоения сырьевой базы страны требуется адекватная мехатронная техника, позволяющая решать задачу добычи полезных ископаемых при постепенном снижении непосредственного участия человека в технологическом процессе, одновременном повышении надежности техники и увеличении объемов добычи.

К основным машинам, предназначенным для ведения открытых горных работ, относятся буровые станки, экскаваторы и транспортные машины, которые, с точки зрения мехатроники, представляют собой мехатронные комплексы.

В настоящей работе под мехатронным комплексом понимается совокупность мехатронных систем, направленная на решение единой задачи управления с учетом критериев эффективности и надежности

Значительный вклад в развитие приводов и СУ (систем управления) как компонентов мехатронного комплекса машин для ведения горных работ внесли такие выдающиеся ученые, как: Г. И. Бабокин [1], Ю. Я. Вуль [2], А. Б. Ефременков [3], В. М. Завьялов [4], В. И. Ключев [5], А. Е. Козярук [6], А. А. Кулешов [7], А. В. Ляхомский [8], А. А. Мариев [9], А. Я. Микитченко [10], М. Б. Носырев [11], Р. Ю. Подэрни [12], Н. А. Серов [13], Н. Н. Чулков [14], С. Hendricks [15], J. Maercks [16], Н. Wu [17] и другие [18, 19, 20, 21, 22, 23].

Неоценимый вклад в теорию и практику исследования мехатронных систем используемых в горных машинах внесли выдающиеся российские и иностранные ученые: С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко, Ю.В. Подураев, Ю.В. Илюхин, С.Г. Герман-Галкин, В.Е. Пряничников, Bichop R.H., Moon F.C. и другие [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32].

Развитие экскаваторной техники началось в XVI веке и продолжается до

настоящего времени. На первом этапе развития (XVI – XIX вв.) происходил переход от мускульных источников энергии к паровым машинам. В XX веке основным направлением в развитии карьерных экскаваторов было увеличение объема ковша, а также внедрение и совершенствование электрических и гидравлических приводов главного движения.

Дальнейшее развитие карьерной техники связано с созданием интеллектуального горного производства, отличающегося высоким уровнем организации процессов управления, что обеспечивает повышение надежности и эффективности работы машин, повышение безопасности проведения горных работ, а также снижение влияния человеческого фактора [33] и доли ручного труда вплоть до полной роботизации горной техники.

Повышение уровня автоматизации мехатронного комплекса карьерного экскаватора предполагает использование методов искусственного интеллекта и новых информационных технологий, что необходимо для интеграции мехатронного комплекса в единое информационное пространство горного предприятия [34]. Специфические особенности открытых горных работ, такие как тяжелые условия эксплуатации карьерных машин, сложные климатические условия, передвижные линии электропитания и перемещение фронта работ, ограничивают непосредственное использование технических решений, которые эффективно применяются в других областях техники.

Уникальность экскаваторной техники определяет необходимость специального индивидуального подхода к информатизации и интеллектуализации мехатронных комплексов горных машин.

Существующее противоречие между практической потребностью повышения эффективности, надежности и безопасности карьерных экскаваторов, снижения влияния человеческого фактора и доли ручного труда за счет интеграции мехатронного комплекса карьерного экскаватора в единое информационное пространство горного предприятия с одной стороны, и отсутствием адекватных методологических и технических решений информатизации и интеллектуализации мехатронного комплекса карьерного

экскаватора с другой стороны, определяет актуальность исследований в данном направлении.

Работа выполнялась в период с 2012 по 2016 г. во Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и соответствует п. 13 «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем» перечня критических технологий Российской Федерации, утвержденного Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г.

Научно-исследовательская работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственные контракты № 2010-400-074-3973 и П-236) и гранта РФФИ №14-08-00455 (2014 – 2015 годы).

Цели и задачи работы. Целью настоящей работы является повышение уровня организации процессов управления мехатронным комплексом карьерного экскаватора за счет интеллектуализации систем управления.

Для достижения указанной цели сформулирована **научная задача**: разработать математическое описание компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, ориентированное на решение задач интеллектуального управления, контроля и диагностики и на его основе разработать новые алгоритмы интеллектуального контроля и управления для компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора.

Решение научной задачи предполагает разработку математических моделей физической надежности компонентов мехатронного комплекса экскаватора; разработку новых алгоритмов и программных средств контроля состояния и оценивания ресурса компонентов мехатронного комплекса экскаватора на основе интеллектуальной обработки данных; разработку новой программной системы анализа данных информационно - диагностической системы (ИДС), включая систему удаленного мониторинга.

Методы исследования. Для решения сформулированной научной задачи использованы методы математического моделирования физических процессов,

методы математического анализа и численные методы математики. Соответствующие теоретические и экспериментальные исследования проводились с использованием сред программирования Matlab/Simulink и Python.

Основные положения, защищаемые автором

1. математическое описание компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, реализованное в среде Matlab/Simulink, ориентированное на решение задач интеллектуального управления, контроля и диагностики, включающее в себя модели физической надежности компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора.

2. Структура информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, построенная по принципу децентрализованной информационно - управляющей сети.

3. Новый алгоритм оценки состояния компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, разработанный с применением нейронных сетей и логических правил.

4. Новый способ идентификации параметров электропитающей системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, обеспечивающий непрерывный контроль параметров системы по результатам совокупных измерений активного и реактивного сопротивлений электропитающей линии.

5. Новые способы интеллектуального контроля, визуализации и оценивания ресурса щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) электрического двигателя постоянного тока, обеспечивающие повышение надежности контроля работы щеточно-коллекторного узла.

6. Новые способы определения ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, обеспечивающие повышение точности и надежности контроля данных показателей.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Предложена и исследована структура интеллектуальной информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, основанная на концепции децентрализованной информационно - управляющей сети.

2. Разработаны модели компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, ориентированные на решение задач контроля, диагностики и интеллектуального управления.

3. Разработана методика контроля эффективности работы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, основанная на интеллектуальном анализе данных ИДС.

4. Разработана методика контроля параметров электропитающей системы мехатронного комплекса экскаватора, основанная на анализе токов и напряжений на вводе экскаватора.

5. Разработана методика контроля ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, основанная на моделировании физической надежности ЩКУ двигателей постоянного тока, силовых трансформаторов и автоматических выключателей с использованием рабочих сигналов мехатронного комплекса.

Практическая ценность работы. Предложенные алгоритмы оценки состояния и контроля ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора позволяют повысить уровень организации процессов управления за счет непрерывного мониторинга работы компонентов мехатронного комплекса экскаватора, анализа данных с помощью локальных информационно - диагностических модулей, а также информационного взаимодействия машин и персонала в рамках ЕИП (единого информационного пространства).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: результатами теоретических исследований, основанных на применении дифференциальных уравнений, численных методов решения систем нелинейных уравнений, физических основ надежности электромеханических систем; проведением оценки адекватности разработанных моделей физической надежности компонентов мехатронного комплекса

карьерного экскаватора с использованием реальных показателей, полученных при эксплуатации экскаваторов.

Реализация результатов работы. Теоретические результаты, модели, алгоритмы, прикладные программы и практические разработки использованы в ООО «Компания Объединенная Энергия» (г. Москва) при проведении научно-исследовательских работ, направленных на реализацию перспективных решений интеллектуализации карьерных экскаваторов (см. приложение 2). Полученные в результате выполнения работ алгоритмы интеллектуальной диагностики компонентов мехатронных систем, а также способ идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор, использованы в инновационной деятельности компании.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических мероприятиях:

1. XXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2015).
2. XXXIX Международной молодежной научно-технической конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2013).
3. Международной научно-технической конференции «Трибология и надежность» (Санкт-Петербург, 2013).
4. Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения» (Москва, 2013).
5. Всероссийской научно-технической конференции «Информационно - измерительные и управляющие системы военной техники» (Владимир, 2014).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ и 5 патентов на изобретения.

Объем работы. Диссертация изложена на 171 с. машинописного текста, содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 126 наименований, 4 приложения, 3 таблицы и иллюстрируется 56 рис.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

1.1. Современное состояние и перспективы развития мехатронных систем для карьерных экскаваторов

Развитие горного производства можно разделить на три основных этапа:

- этап ручного производства;
- этап механизации труда;
- этап автоматизации и интеллектуализации.

Этапу ручного производства соответствует наиболее продолжительный период времени, продолжавшийся вплоть до конца XVIII – начала XIX вв.

Этап механизации труда (первая промышленная революция) охватывает период времени от начала XIX до середины XX вв. Началу этого этапа соответствует массовое внедрение первых землеройных машин.

Первые экскаваторы в качестве основного (первичного) двигателя использовали паровую машину.

Моментно-скоростные характеристики паровой машины и рабочего оборудования экскаватора хорошо согласовывались (паровая машина могла развивать крутящий момент даже при заторможенном вале), что упрощало механические передачи.

Производство одноковшовых экскаваторов в России было начато в 1901 г. на Путиловском заводе (ныне Тверской экскаваторный завод). В СССР производство экскаваторов было запущено в 1931 г. С 1947 г. Уральский завод тяжелого машиностроения (УЗТМ) впервые в мире организовал серийный выпуск карьерных экскаваторов с ковшами емкостью 3-5 м³. В 1958 г. на УЗТМ был изготовлен шагающий экскаватор-драглайн с ковшом 25 м³ и стрелой 100 м, а на Новокраматорском машиностроительном заводе (НКМЗ) в 1965 г. – экскаватор-лопата с ковшом 35 м³ для крепких грунтов [35].

В марте 1977 г на разрезе Назаровский в Красноярском крае в эксплуатацию был введен экскаватор ЭШ-100.100 №1, имевший емкость ковша 100 м^3 [36]. ЭШ-100.100 был на тот момент крупнейшим одноковшовым экскаватором в Евразии.

Дальнейшее увеличение размеров ковша связано с опережающим увеличением массы машины, что ограничено несущей способностью грунтов, а также прочностью материала, составляющего конструкцию самого экскаватора. Таким образом, конструкторы достигли предела возможностей классической схемы механической лопаты [36].

Гигантские экскаваторы XX столетия строились, как правило, по конструкции «драглайн», вместе с тем экскаваторы типа «прямая лопата» имели значительно меньший объем ковша. В XXI объем ковша экскаваторов типа «прямая лопата» постепенно увеличивается. В Китае уже разработан экскаватор типа «прямая лопата» с объемом ковша 75 м^3 [37].

В середине XX века, карьерные экскаваторы, оснащенные электрическими и гидравлическими приводами, полностью заменили паровые.

В 50-х годах XX века начинается качественно новый этап развития горной техники – этап *автоматизации*, а позднее (в начале XXI века) – *интеллектуализации* машин. Происходит интеллектуальное высвобождение человека.

Электроприводы того времени работали по системе Г-Д (генератор – двигатель). Применение двигателей переменного тока было затруднено вплоть до конца XX столетия, когда появилась новая силовая полупроводниковая техника.

Новые электроприводы для карьерных экскаваторов, появившиеся в конце XX – начале XXI века, имеют значительно улучшенные энергетические характеристики по сравнению с системой Г-Д. Примером такого привода может послужить система ТрП-Д (транзисторный преобразователь – двигатель постоянного тока). Электроприводами, построенными по системе ТрП-Д, оснащаются современные карьерные экскаваторы российского производства, например ЭКГ-18Р. Энергоемкость экскавации ЭКГ-18Р составляет $0,39 \text{ кВт ч/м}^3$,

тогда как экскаваторы с электроприводами системы Г-Д имеют энергоемкость экскавации от 0,6 до 1,0 кВт ч/м³, что подтверждается исследованиями ООО «Компания Объединенная Энергия».

В XXI веке интеллектуализация становится приоритетным направлением в различных областях техники, в том числе и в горной отрасли. Так, в 2011 году создана секция научного совета РАН по вопросам создания интеллектуального горного производства [38].

Значительного успеха в области интеллектуализации мехатронных систем достигла автомобильная промышленность, наиболее показательным здесь является пример компании Tesla Motors, которая в 2015 году внедрила в свои автомобили Tesla Model S систему автономного управления движением [39].

Перспективным направлением в области интеллектуализации горной техники является организация интеллектуальных предприятий.

«Интеллектуальный карьер» – технология будущего, реализующая роботизированную добычу полезных ископаемых. Ее применение особенно актуально в труднодоступных местах и регионах с тяжелыми климатическими условиями. Подобный опыт уже имеют такие страны-лидеры по добыче полезных ископаемых, как Чили (с 2009 г производится внедрение роботизированных самосвалов), Канада (к 2016 г планируется создание восьми роботизированных горных производств) и Австралия (с 2009 г производится внедрение роботизированных карьеров) [38].

В России также начаты и ведутся работы по созданию уникальной автоматизированной системы добычи полезных ископаемых на основе роботизированной горной техники, одним из участников этих работ является компания ООО «ВИСТ-Групп». Целью проекта является создание первой в России и СНГ технологии добычи полезных ископаемых на открытых горных разработках, позволяющей облегчить и оптимизировать труд операторов техники, сделать его более эффективным и безопасным. [40]. Прогнозируется, что применение такого подхода позволит не только повысить производительность труда на 10...15 % за счет эффективности использования горной техники, но и

приведет к сокращению нетехнологических простоев машин и снижению затрат на проведение внеплановых ремонтных работ. При помощи дистанционного управления можно будет направлять роботизированные погрузочные машины в труднодоступные места, где, даже при соблюдении всех требований техники безопасности, существует потенциальная опасность обрушения горной массы [41].

Реализация «Интеллектуального карьера» возможна только на основе использования новых машин с высокоэффективным интеллектуальным управлением и карьерный экскаватор является здесь основной машиной.

Экскаваторы нового поколения, использующие современные управляющие системы, обеспечивают повышение эффективности горных работ на основе использования достижений информационных технологий, мехатроники и телекоммуникаций. Успешное применение мехатронных систем главного движения, компьютерных информационно - диагностических систем, современных средств защиты, аппаратных и программных средств передачи, обработки и анализа данных и др. на экскаваторах ООО «ИЗ-КАРТЭКС» и ОАО «Уралмашзавод» позволило повысить технический уровень отечественных машин, снизить затраты на наладку и ремонты, уменьшить в 1,5...2 раза удельную энергоемкость экскавации. Дальнейшее развитие интеллектуальных систем управления горной техникой с учетом достижений в смежных отраслях позволит предложить новое решение задач по управлению промышленным оборудованием со значительной экономией времени и средств [41].

Помимо интеллектуализации, развитие экскаваторной техники идет одновременно по нескольким направлениям, важная роль здесь принадлежит улучшению материалов механической составляющей экскаватора, а также улучшению взаимодействия человека и машины на основе принципов инженерной психологии.

1.2. Электрооборудование и мехатронные системы современных карьерных экскаваторов

К основным мехатронным системам карьерного экскаватора относятся: энергетическая система, взаимосвязанные системы главного движения – система подъема, система напора (система тяги у драглайнов), система поворота, система хода (ходовое оборудование), информационно - диагностическая система и телекоммуникационная система.

Электропитание экскаватора осуществляется от передвижных высоковольтных линий электропередачи напряжением 6 кВ трехфазного переменного тока.

Цикл экскавации современного карьерного экскаватора длится порядка 30-50 секунд (см. рисунок 1.1), за это время несколько раз происходит потребление и рекуперация электроэнергии [42].

Из-за высокой мощности электроприводов карьерных экскаваторов (мощность каждого двигателя составляет несколько сотен киловатт) и достаточно быстрого цикла экскавации, происходят значительные снижения (во время потребления) и повышения (во время рекуперации) напряжения питающей сети. Для обеспечения нормальной работы электрооборудования экскаваторов допустимое колебание напряжения питающей сети должно быть в пределах от – 5% до 10% от номинального [43].

Энергетическая система мехатронного комплекса экскаватора включает:

- ячейку высоковольтного ввода;
- силовые трансформаторы;
- звено постоянного тока (системы с двигателями переменного тока), управляемые выпрямители (система тиристорный преобразователь – ДПТ), электромашинные усилители (система Г-Д).

Ячейка высоковольтного ввода (ЯВВ) предназначена для подключения питания и защиты электрооборудования мехатронного комплекса карьерного экскаватора. В состав ЯВВ входят: вакуумные выключатели нагрузки,

ограничители перенапряжений, устройства защитного отключения, устройства контроля сопротивления изоляции, устройства учета электроэнергии, устройства учета и контроля состояния оборудования.

Энергетическая система экскаватора включает в себя два отдельных трансформатора – трансформатор собственных нужд (ТСН) и трансформатор приводов главного движения (ТПД).

Активный выпрямитель представляет собой регулируемый источник напряжения, питающий звено постоянного тока. Напряжение в звене постоянного тока поддерживается постоянным и практически не зависит от напряжения в сети, как при потреблении, так и в режиме рекуперации [42].

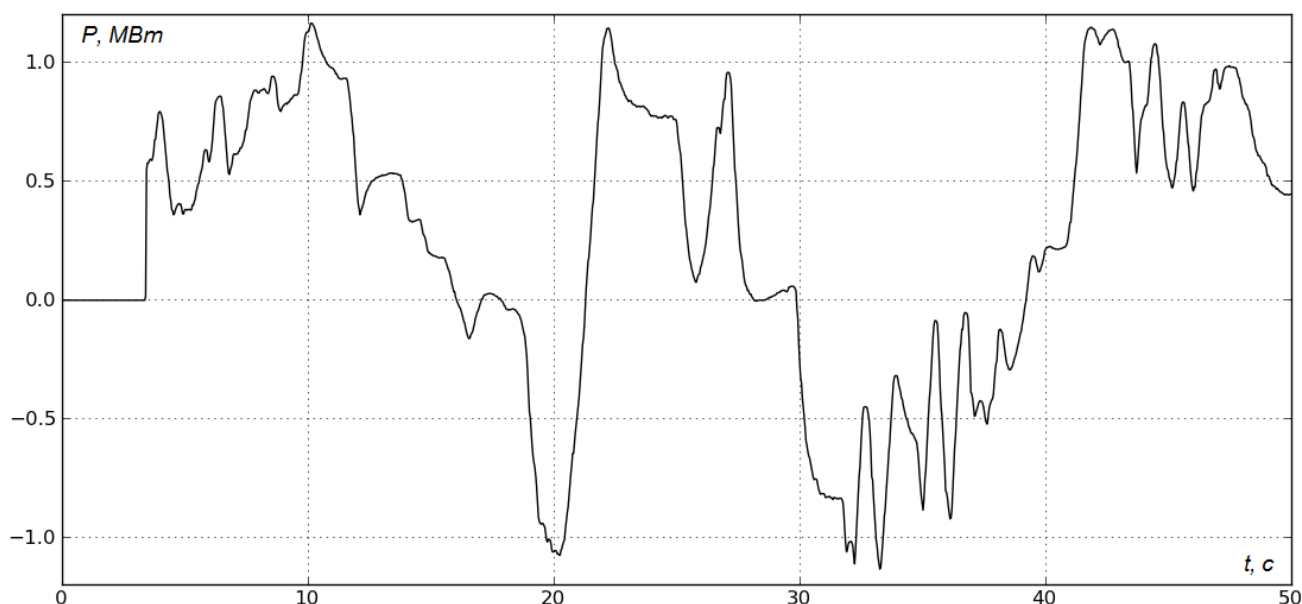


Рисунок 1.1 – Диаграмма активной мощности, потребляемой экскаватором ЭКГ-18Р во время цикла экскавации

Управление компонентами вектора тока, потребляемого из сети или отдаваемого в сеть, обеспечивает практически синусоидальную форму тока, благодаря чему достигаются наилучшие условия электромагнитной совместимости оборудования. Использование алгоритмов векторного управления позволяет регулировать коэффициент мощности и компенсировать, таким образом, реактивную мощность [42].

Мехатронные системы главного движения современных карьерных экскаваторов строятся по различным схемам: Г-Д, ТП-Д (тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока) ТрП-Д, ПЧ-АД (преобразователь частоты – асинхронный двигатель). В настоящее время ведутся работы по внедрению электроприводов системы ВИД (вентильно-индукторный двигатель), в теории обладающих большим КПД по сравнению со всеми описанными выше схемами. Выбор схемы зависит от типа применяемых электродвигателей. При построении систем главного движения применяются:

- двигатели постоянного тока (система Г-Д, ТП-Д, ТрП-Д);
- асинхронные двигатели (система ПЧ-АД).

Общая структурная схема мехатронного комплекса карьерного экскаватора представлена на рисунке 1.2..

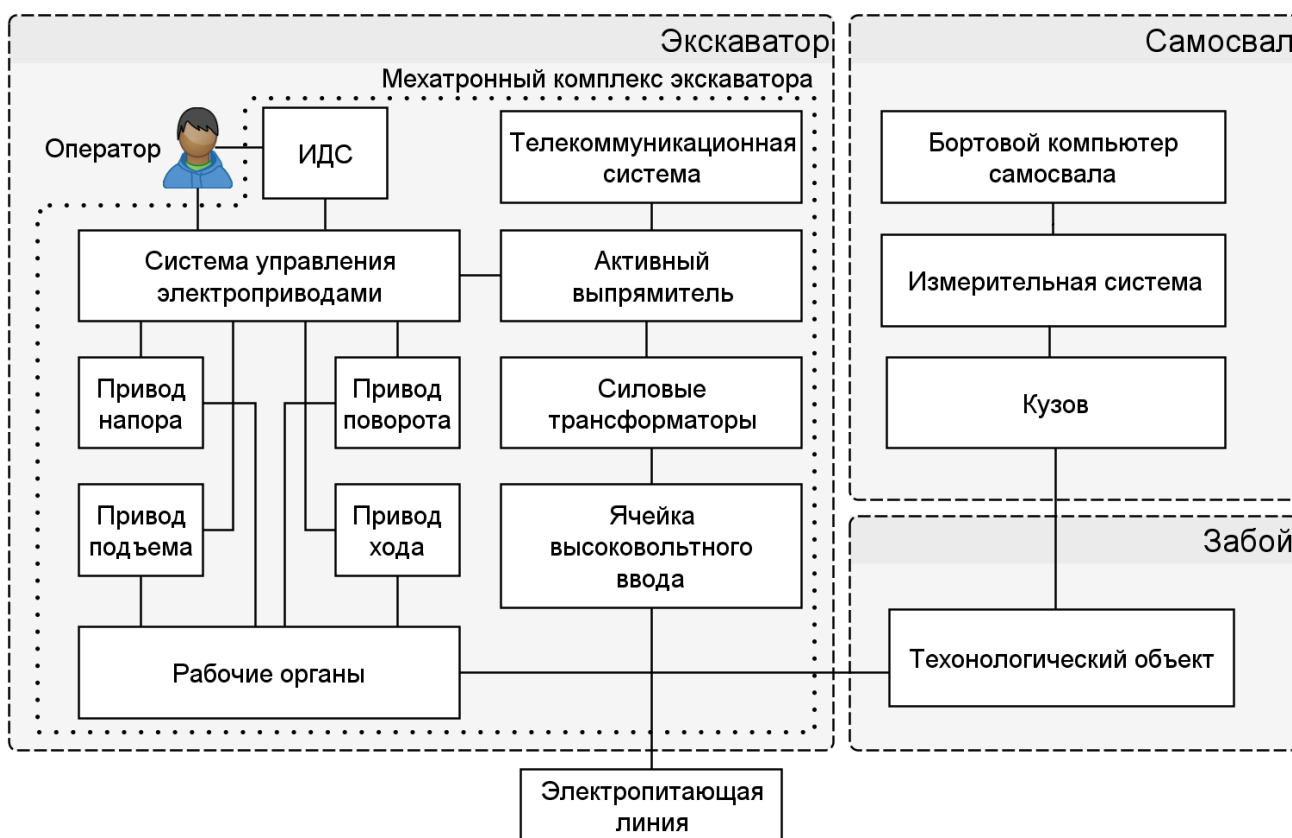


Рисунок 1.1 – Структура мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Рассмотрим более подробно системы главного движения современных карьерных экскаваторов.

Компании Caterpillar и Joy Global для приводов главного движения карьерных экскаваторов применяют двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, питаемые от регулируемых генераторов (система Г-Д), а также более современные схемы, такие как ПЧ-АД с алгоритмом управления DTC (прямое управление моментом).

На рисунке 1.3 приведена схема мехатронного модуля главного движения «DTC-Control», разработанного компанией P&H (подразделение Joy Global) и применяемая в мехатронном комплексе экскаваторов P&H 4100C BOSS.

Прямое управление моментом (DTC) является одним из методов, используемых в частотно-регулируемых приводах для управления крутящим моментом (и, таким образом, скоростью) трехфазного электродвигателя переменного тока. Это предполагает расчет магнитного потока и вращающего момента электродвигателя на основе измерения напряжения и тока двигателя.

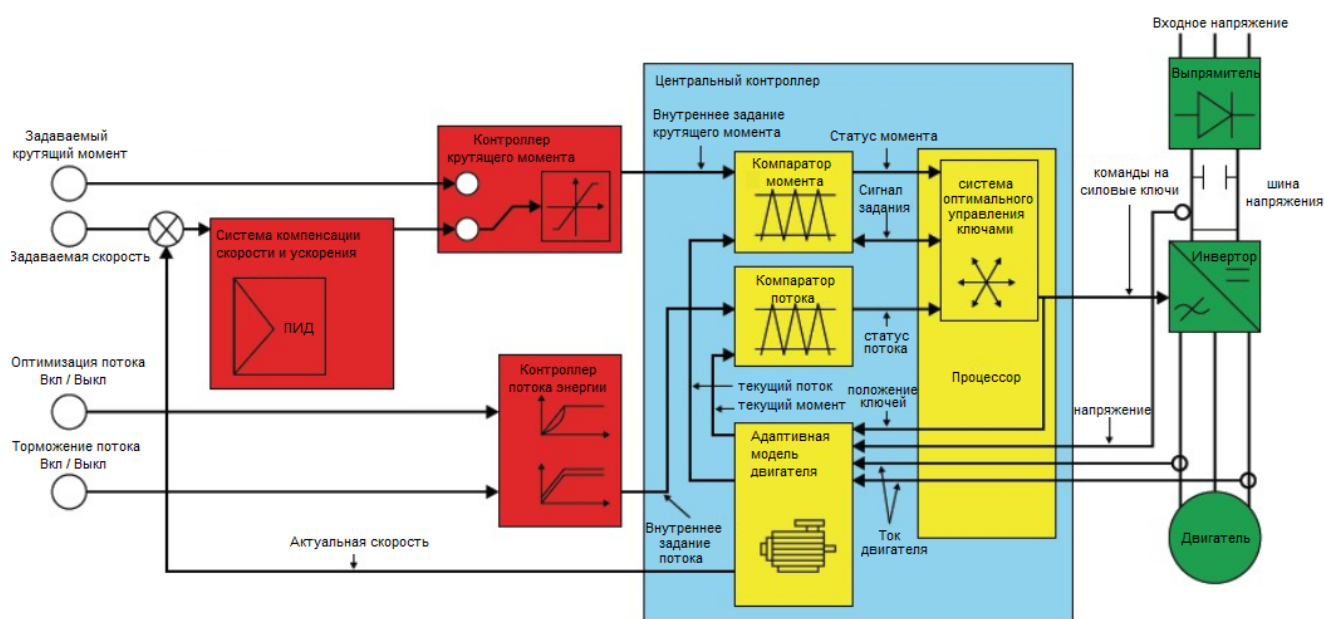


Рисунок 1.3 – Структурная схема мехатронного модуля движения карьерного экскаватора

P&H 4100C BOSS

Потокосцепление статора оценивается путем интегрирования напряжения статора. Крутящий момент оценивается, как векторное произведение вектора потокосцепления статора и измеренного вектора тока двигателя. Расчетная величина магнитного потока и крутящего момента сравниваются с их эталонными

значениями. Если расчетный магнитный поток или крутящий момент отличаются от эталонных значений более чем на заданную величину, транзисторы частотно-регулируемого привода отключаются и, таким образом, магнитный поток и крутящий момент возвращаются в свои диапазоны допустимых значений.

Особенностью реализации алгоритма DTC в системе управления электроприводом разработки Р&Н является использование адаптивной модели двигателя, изменяющей свои параметры в процессе работы системы.

В мехатронных комплексах современных карьерных экскаваторов российского производства применяются системы Г-Д, ТП-Д, ПЧ-АД и ТрП-Д.

На рисунке 1.4 показана типовая функциональная схема электропривода главного движения (схема – ТрП-Д) нового экскаватора, разработанная ООО «Компания Объединенная Энергия» [41]. Электроприводы напора, подъема и поворота реализованы по принципу подчиненного регулирования координат. Главная обратная связь замкнута по напряжению якорной обмотки двигателя постоянного тока. Внутренний подчиненный контур выполняет регулирование тока якорной обмотки двигателя. Регулирование выходного напряжения мостового транзисторного преобразователя управления двигателем осуществляется путем широтно-импульсной модуляции. Сигнал задания формируется с помощью устройства формирования сигнала управления приводами (УФСУП) с учетом ограничений положения ковша. Реальное положение ковша в пространстве вычисляется на основе сигналов энкодеров, установленных на лебедках приводов подъема и напора (тяги) и сравнивается с моделью ограничений.

В приводе использованы адаптивный пропорционально-интегральный регулятор тока и пропорциональный регулятор напряжения. Система управления обеспечивает формирование специальной экскаваторной характеристики привода. С целью улучшения динамических характеристик системы использованы нелинейный задатчик интенсивности и нелинейная обратная связь по току [41].

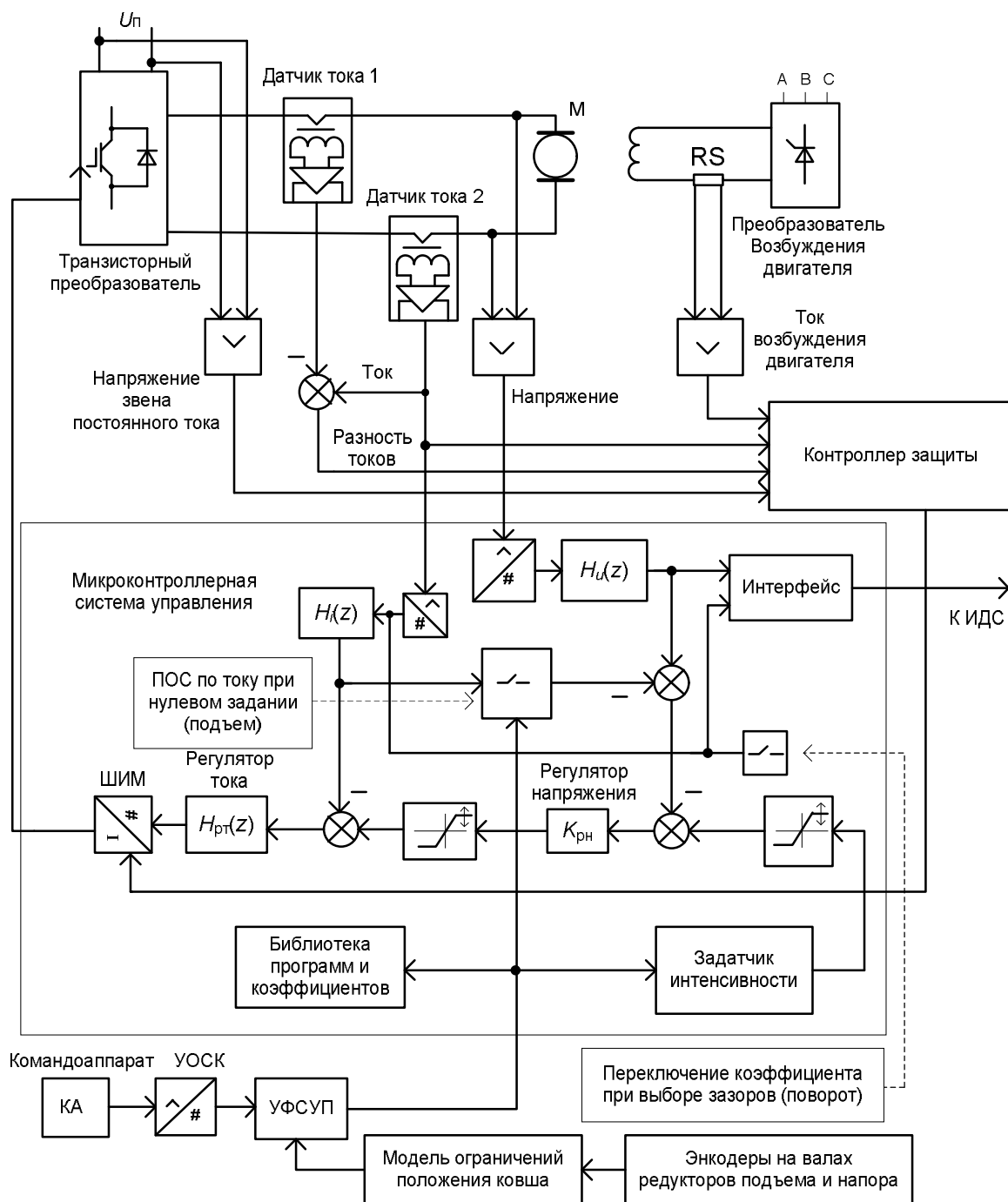


Рисунок 1.4 – Функциональная схема привода главного движения разработки ООО «Компания Объединенная энергия» (УОСК – устройство обработки сигналов командоаппаратов; $H_u(s)$ и $H_i(s)$ – передаточные функции преобразователей напряжения и тока; $H_{рт}(s)$ – передаточная функция регулятора тока)

Все электроприводы выполнены по одной принципиальной схеме. Задание алгоритма соответствующего привода осуществляется программным способом. В электроприводе поворота применен специальный алгоритм управления,

обеспечивающий безударный выбор зазоров путем изменения параметров задатчика интенсивности в функции тока якорной обмотки. В приводе подъема применена положительная обратная связь по току для обеспечения удержания ковша. В приводе организованы защиты, действующие на отключение сигнала управления: максимальная токовая защита, защита от нарушения равенства токов в ветвях, защита от превышения напряжения в звене постоянного тока [41].

1.3. Интеллектуальные системы и перспективы их применения в мехатронных системах карьерных экскаваторов

В настоящее время существуют различные определения интеллектуальной системы (ИнС). Ряд авторов дает определение ИнС, как системы, способной изменять свою цель во время работы [44], для других ИнС – это такая система, в которой логическая обработка данных превалирует над вычислительной [45], для третьих, ИнС – это техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы [46]. Существуют и другие определения ИнС [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56].

Одним из общепринятых вариантов, является формулировка ИнС К.А. Пупкова, в которой под ИнС предложено понимать объединенную информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения, работающую во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно, способную на основе сведений и знаний при наличии мотивации синтезировать цель, принимать решение к действию и находить рациональные способы достижения цели [57].

ИАСУ (интеллектуальная система автоматического управления) – это система, имитирующая когнитивные функции живых существ и предназначенная для управления различными техническими процессами, использующая для этого такие методы, как логические правила, нейронные сети, обратные связи и др.

Когнитивные функции – это высшие мозговые функции, такие как память, внимание, координация, речь (ее воспроизведение и понимание), счет, мышление, ориентация, планирование, контроль.

Проведем краткий анализ СУ (уровня АСУ ТП) современных карьерных экскаваторов отечественного и зарубежного производства с целью анализа их интеллектуальных возможностей.

Начиная с 2005 г., в основе мехатронного комплекса карьерных экскаваторов компании P&H (подразделение Joy Global Inc.) лежит система управления и сбора данных *Centurion* [58]. Аппаратные и программные компоненты этой системы специально разработаны для создания высокоэффективной и тесно связанной сети контроля, управления и передачи данных. Система позволяет осуществлять высокотехнологичный доступ и управление системой приводов, минимизировать время цикла, анализировать производительность экскаватора, контролировать действия оператора, а также частично автоматизировать управление экскаватором, что приводит к значительному увеличению производительности машины.

Система *Centurion* представляет собой технологию, лежащую в основе нового поколения средств управления механической лопатой. Начиная от входного электропитания до движений ковша, подъема, напора, поворота и т.д., *Centurion* координирует все основные операции экскаватора.

Стандартные функции системы *Centurion* включают в себя:

- Автоматическое «мягкое» опускание ковша обеспечивает автоматическое восстановление после подъема стрелы, не нарушая цикла экскавации. Данная система защищает целостность конструкции экскаватора, тем самым увеличивая его долговечность.
- Система ограничения предела крутящего момента включается, когда ковш погружается в пласт, уменьшая поперечные силы, которые вызывают механическое повреждение оборудования.

- Улучшенные возможности диагностики с интеллектуальной системой ввода-вывода (*Smart I/O*) и графическим интерфейсом пользователя облегчают поиск неисправностей и увеличивают среднее время наработки до ремонта.

Используя стандартные промышленные коммуникации и программные протоколы, *Centurion* объединяет несколько функций в одной сети управления с обратной связью и коммуникации с высокой степенью масштабируемости. *Smart I/O* связан через высокоскоростные сети *Profibus* по оптоволоконному кабелю. Графический интерфейс пользователя и другие программные инструменты построены на стандартах *OPC*-серверов и протоколе *Ethernet* в качестве среды передачи данных.

Компания BUCYRUS (подразделение Caterpillar), в настоящее время оснащает свои карьерные экскаваторы специализированной SCADA-системой. Данная система обеспечивает сбор данных с различных мехатронных узлов машины и предоставляет их машинисту путем вывода на панель оператора в удобочитаемой форме.

С помощью данной системы оператор также может взаимодействовать с машиной, например, в режиме замены канатов с панели оператора возможно осуществлять включение/выключение тормозов подъема, поворота и напора, что позволяет содействовать корректной запасовке канатов и обеспечить полное управление движением барабанов [59].

Современные карьерные экскаваторы российского производства также оснащаются различными SCADA-системами (например, ПУЛЬСАР-7). Интерфейс пользователя одной из таких систем приведен на рисунке 1.5. Важной особенностью данной системы является возможность удаленного доступа к панели оператора за счет применения современных телекоммуникационных систем.

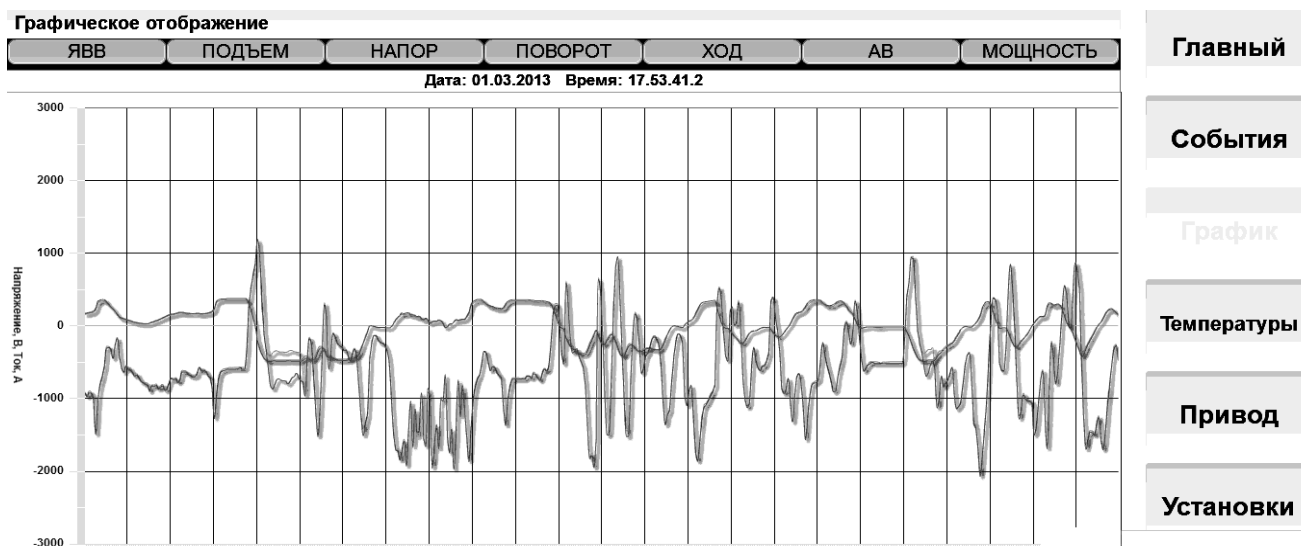


Рисунок 1.5 – Интерфейс панели оператора системы «ПУЛЬСАР 7»

Современные технические средства обработки информации обеспечивают решение актуальных задач управления контроля и диагностики мехатронного комплекса карьерного экскаватора, при этом требуется разработка алгоритмического и программного обеспечения для оценки состояния, ресурса и эффективности работы оборудования, учитывающего специфику отдельных компонентов.

1.4. Современные телекоммуникационные системы в составе мехатронного комплекса горных машин

Современная телекоммуникационная система мехатронного комплекса карьерного экскаватора обеспечивает удаленный доступ между бортовым компьютером экскаватора и персональным компьютером посредством их подключения к сети Internet, при этом специалист имеет возможность проводить анализ неисправностей, находясь практически в любой точке мира.

Непосредственно участвуя в поддержке жизненного цикла машин текущего поколения, использование телекоммуникационных систем создает задел для дальнейшего совершенствования мехатронного комплекса экскаватора.

Средства и системы телекоммуникаций мехатронного комплекса карьерного экскаватора используют современные наработки в области

проектирования корпоративных телекоммуникационных сетей [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. На сегодняшний день актуальны следующие задачи:

- организация межблочного взаимодействия АСУ всех уровней, как по вертикали, так и по горизонтали;
- организация взаимодействия подсистем АСУ с сетью Internet при повышенных требованиях к информационной безопасности;
- повышение надежности ЕИП, в котором работают АСУ всех уровней.

Для организации удаленного доступа к АСУ используются различные беспроводные технологии, в том числе *GSM*, *GPRS*, *3G*, спутниковая связь и др.

Целесообразным является объединение машин интеллектуального карьера в ЕИП, представляющее собой беспроводную или смешанную локальную сеть, узлами которой являются бортовые компьютеры экскаваторов и шлюз, обеспечивающий доступ к сети Internet. Такое решение позволяет использовать одно активное Internet-соединение для всего карьера. В случае использования спутниковой связи приемно-передающая антенна размещается на специальной вышке, что существенно улучшает качество связи.

На рисунке 1.6 представлена схема современной телекоммуникационной системы карьерного экскаватора, оснащенного ИДС «ПУЛЬСАР-7».

В данной системе возможность удаленного доступа реализована двумя способами:

- с использованием проприетарного ПО «ПУЛЬСАР-7»;
- с использованием программного обеспечения Team Viewer.

Интерфейс ПО Team Viewer представлен на рисунок 1.7. Это программное обеспечение, по сути, обеспечивает удаленный доступ к «рабочему столу» компьютера телекоммуникационной панели. Такой подход, несмотря на свою простоту, имеет ряд существенных недостатков:

- изображение «рабочего стола» передается посредством видеопотока, требующего значительной пропускной способности канала связи (что

физически невозможно, например, при использовании *GSM WAP* соединения);

- при шифровании Internet-трафика, пропускная способность канала может значительно понижаться, кроме того шифрование/дешифрование видеопотока – крайне ресурсозатратная операция;
- при таком подходе к организации удаленного доступа за компьютером может нормально работать только один человек, а машинист экскаватора не сможет нормально работать с информационной панелью.
- важной задачей является изменение структуры локальной вычислительной сети экскаватора (и карьера в целом) с целью организации многопользовательского доступа к ресурсам машины и понижения информационного потока, передаваемого по сети Internet.

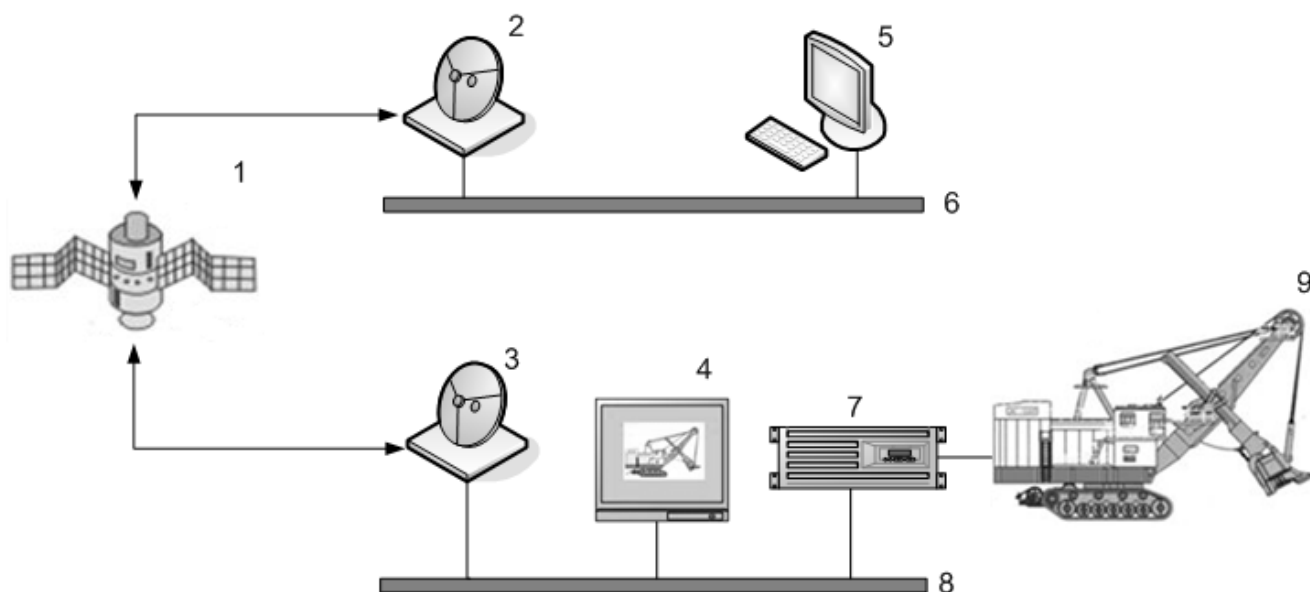


Рисунок 1.6 – Структурная схема телекоммуникационной системы карьерного экскаватора, оснащенного информационно - диагностической системой ПУЛЬСАР-7, 1 – спутник связи, 2,3 – спутниковые приемопередатчики, 4 – информационная панель, 5 – удаленный компьютер, 6,8 – шина данных, 7 – устройство сопряжения, 9 – экскаватор

Помимо удаленного доступа к информационным ресурсам экскаватора с персонального компьютера, интерес представляет удаленный доступ с планшета и мобильного телефона. Такой подход позволит повысить оперативность анализа

неисправностей в работе машины. Данная технология применяется в смежных отраслях, например в автомобилестроении.

Важным фактором, значительно влияющим на эффективность работы горного предприятия, является время простоя экскаватора между убытием одного и прибытием другого самосвала, а также время простоя самосвала в случае, если на момент его прибытия экскаватор еще не закончил загрузку предыдущего. Использование технологий *GPS* и ГЛОНАС, позволяет отслеживать местоположение самосвала и производить оценку времени его прибытия, что дает возможность оптимально распределять ресурсы карьера и минимизировать простои техники.



Рисунок 1.7 – Интерфейс ПО Team Viewer, передающего в реальном времени видеопоток с ИДС карьерного экскаватора

Таким образом, применение средств телекоммуникации позволяет сократить время простоев техники, что, в конечном итоге, обеспечивает значительное повышение эффективности работы всего карьера в целом.

Несмотря на активное применение телекоммуникационных технологий в мехатронном комплексе карьерного экскаватора, современный карьерный

экскаватор пока не может быть интегрирован в состав интеллектуального карьера. Для решения этой задачи необходимо обеспечить информационное взаимодействие карьерного экскаватора, автосамосвалов и персонала горного предприятия, а также проектной организации, занимающейся разработкой и совершенствованием компонентов мехатронного комплекса машин в единое информационное пространство (ЕИП).

Единое информационное пространство представляет собой совокупность информационно - телекоммуникационных систем и сетей, баз данных, технологий их ведения и использования, функционирующих на основе единых принципов и по общим правилам, обеспечивающим информационное взаимодействие входящих в него подсистем [67].

ЕИП имеет три иерархических уровня:

- уровень взаимодействия компонентов мехатронного комплекса;
- уровень взаимодействия машин горного предприятия;
- уровень взаимодействия в рамках «Интернета вещей», позволяющий объединить машины горного предприятия и их компоненты, а также серверы, рабочие станции, планшетные компьютеры и мобильные телефоны сотрудников горного предприятия, завода-изготовителя компонентов мехатронных комплексов машин, научно-исследовательских и других организаций в ЕИП.

«Интернет вещей» (ИВ) – концепция вычислительной сети физических объектов, оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой [68], рассматривающая организацию таких сетей как явление, способное перестроить экономические и общественные процессы, исключаящее из части действий и операций необходимость участия человека [69].

При реализации ИВ особую роль имеют облачные технологии. Применительно к ИВ выделяют три вида облачных сервисов:

- сервисы хранения данных;

- сервисы обработки данных;
- сервисы передачи данных.

Сервисы передачи данных используются для передачи данных из ИВ на устройства, не имеющие физического доступа к сети Internet, например, на мобильные телефоны, для чего используются сервисы голосовой связи и передачи мгновенных сообщений SMS. Использование таких сервисов в совокупности с системой интеллектуального анализа данных обеспечивает наделение экскаватора элементами искусственного интеллекта [29].

1.5. Задачи и средства диагностики мехатронных систем карьерных экскаваторов

Важным компонентом мехатронного комплекса современного карьерного экскаватора является информационно - диагностическая система (ИДС).

Информационно - диагностическая система позволяет повысить производительность горнотранспортного комплекса за счет оперативного контроля хода производственных процессов и эффективного диспетчерского управления добычей горной массы, она предназначена для автоматизированного контроля работоспособности узлов и агрегатов экскаватора.

ИДС включает: главный компьютер, блок бесперебойного питания, комплект датчиков параметров технологического процесса (ТП), концентраторы данных, локальную компьютерную сеть, модемы и монитор оператора.

Рассмотрим основные особенности современной информационно - диагностической системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора на примере устройства мониторинга состояния шагающих экскаваторов УРЭ-04 и УМЭ-02 производства компании ЗАО «АйСиТи Автоматизация» (г. Новосибирск). Функциональные возможности системы УМЭ-02 соответствуют таковым в системах Centruion и ПУЛЬСАР-7, основные отличия данных систем обусловлены спецификой самих экскаваторов, на которых устанавливаются ИДС.

Устройство учета работы экскаватора УРЭ-04 разработано для машин, оснащенных приводами постоянного тока (система Г-Д) и предназначено для учета следующих показателей работы экскаватора:

- количество нагруженных–выгруженных ковшей (штук);
- оценка массы/объема материала, перегруженного экскаватором ($\text{м}^3/\text{т}$);
- машинное время работы экскаватора в режиме экскавации (час, минута);
- машинное время работы экскаватора в режиме шагания (час, минута);
- машинное время работы синхронного двигателя экскаватора (час, минута);
- активная электроэнергия, потребленная синхронным двигателем ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$);
- активная электроэнергия, потребленная в силовой сети $\sim 380\text{В}$ на борту экскаватора ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$).

УМЭ-02 дополнительно осуществляет контроль состояния основного оборудования экскаватора [70]. К основным возможностям системы относятся:

- контроль электромашин главных приводов экскаватора шагающего (ЭШ) по нагреву подшипников и обмоток;
- контроль наклона платформы ЭШ (крен и дифферент);
- контроль состояния силового трансформатора 6/0,4кВ по температуре обмоток;
- контроль положения ковша по длинам канатов тяги и подъема;
- контроль изоляции в цепях главных и вспомогательных приводов и в цепях схемы освещения;
- контроль включения вентиляции главных приводов;
- контроль включения исполнительных устройств смазки редукторов главных приводов;
- контроль нагрева масла в редукторах главных приводов;
- сбор информации о готовности ЭШ к работе (наличие всех необходимых напряжений питания систем ЭШ);
- контроль качества питающей ЭШ электроэнергии по ГОСТ 13109-97;

- формирование аварийных сообщений о срабатывании защит в системах ЭШ и предоставление подробной информации о причинах аварийной ситуации;
- учет времени работы основного оборудования (моторесурс) ЭШ.

Информационно - диагностическое оборудование карьерных экскаваторов предоставляет оперативную информацию о работе большинства критически важных элементов машины, а благодаря предварительной обработке данных, количество полезной информации существенно увеличивается. Однако такое количество информации представляет интерес лишь в случае возникновения каких-либо неисправностей, в остальных случаях «перегруженный» интерфейс информационной панели машиниста оказывается вредным.

Основным направлением дальнейшего совершенствования информационно - диагностических систем карьерных экскаваторов является расширение функциональных возможностей анализа, контроля и диагностики, а также совершенствование человеко-машинного интерфейса. Решение данных задач предполагает использование новых методов обработки данных, в частности методологии *Data Mining* или интеллектуального анализа данных (ИОД). ИОД – совокупность методов обнаружения в данных ранее неизвестной, нетривиальной, практически полезной и доступной интерпретации информации, необходимой для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности [71].

1.6. Выводы и постановка задачи исследований

На основании проведенного анализа развития современной экскаваторной техники можно сделать следующие выводы:

1. Современный карьерный экскаватор – это сложная и уникальная машина, жизненный цикл которой составляет более 20 лет, во время которого многократно производятся техническое обслуживание, ремонт и модернизация. В современных карьерных экскаваторах активно используются технологии поддержки

жизненного цикла машин, обеспечивающие, как поддержку машин текущего поколения, так и задел для дальнейшего совершенствования мехатронного комплекса карьерного экскаватора.

2. Современные разработки ведущих мировых производителей экскаваторной техники направлены на повышение эффективности использования горных машин, при этом решаются такие задачи, как повышение надежности, производительности, безопасности и снижение энергопотребления. В современных условиях повышение уровня организации процессов управления за счет использования элементов искусственного интеллекта является основным направлением, позволяющим решить поставленные задачи.

3. ИДС современных карьерных экскаваторов предоставляет машинисту большое количество параметров, характеризующих работу машины, однако, на практике одновременный анализ человеком такого количества данных невозможен, поэтому важной задачей является организация интеллектуальной обработки данных информационно - диагностической системы экскаватора.

4. Современные задачи интеллектуальной обработки информации для мехатронного комплекса карьерного экскаватора требуют разработки новых алгоритмов оценивания остаточного ресурса и эффективности работы оборудования, учитывающих специфику отдельных компонентов.

5. Совершенствование ИДС карьерных экскаваторов предполагает интеграцию горных машин в ЕИП горного и проектировочного предприятий, тем самым обеспечивая возможность проведения непрерывных научных исследований.

6. Совершенствование телекоммуникационного оборудования современных карьерных экскаваторов предполагает обеспечение доступа к информационным ресурсам машины не только со стационарных компьютеров, но и с мобильных устройств.

Существующее противоречие между практической потребностью повышения эффективности, надежности и безопасности карьерных экскаваторов, снижения влияния человеческого фактора и доли ручного труда за счет

интеграции мехатронного комплекса карьерного экскаватора в единое информационное пространство горного предприятия с одной стороны, и отсутствием адекватных методологических и технических решений информатизации и интеллектуализации мехатронного комплекса карьерного экскаваторов с другой стороны, определяет актуальность исследований в данном направлении.

Целью настоящей работы является повышение уровня организации процессов управления мехатронным комплексом карьерного экскаватора за счет интеллектуализации систем управления.

В задачи диссертации входят:

- разработка математических моделей физической надежности компонентов мехатронного комплекса экскаватора;
- разработка новых алгоритмов и программных средств контроля состояния и оценивания ресурса компонентов мехатронного комплекса экскаватора на основе интеллектуальной обработки данных;
- разработка новой программной системы анализа данных ИДС, включая систему удаленного мониторинга.

Получение основных результатов работы планируется проводить с использованием методов математического моделирования физических процессов, методов математического анализа и численных методов математики. Для исследования работы экскаватора и характеристик его мехатронных комплексов используется компьютерное моделирование и экспериментальные исследования, проводимые совместно с ООО «Компания Объединенная Энергия».

2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ, МОДЕЛЕЙ И КОМПОНЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

2.1. Структура мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Мехатронный комплекс интеллектуального экскаватора – это совокупность мехатронных систем подъема, напора, поворота, хода, а также энергетической, телекоммуникационной и информационно - управляющей систем, направленная на решение единой задачи управления работой экскаватора с учетом критериев эффективности и надежности, за счет взаимодействия с электропитающей линией, автосамосвалами и персоналом горного предприятия и проектной организации.

Интеллектуальный экскаватор – это машина с высоким уровнем организации процессов управления, контроля и диагностики, эффективным человеко-машинным и телекоммуникационным интерфейсами, адаптивная к изменяющимся условиям горных работ и гармонично взаимодействующая с системами энергоснабжения, транспорта и автоматизированного управления предприятием.

Общая структурная схема мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора представлена на рисунке 2.1.

Интеллектуализацию карьерного экскаватора можно разделить на три взаимосвязанных направления:

- качественное совершенствование традиционных экскаваторов на основе использования элементов искусственного интеллекта в управляющих системах;
- создание экскаватора с дистанционным управлением;
- создание полностью автоматического экскаватора-робота.

Качественное совершенствование мехатронного комплекса карьерного экскаватора предполагает:

- повышение эффективности человеко-машинного интерфейса за счет интеллектуального анализа данных и организации общения машины и человека на естественном языке;
- интеграция мехатронного комплекса экскаватора в единое информационное пространство горного предприятия;
- организация анализа качественных показателей электропитающей линии, снабжающей экскаватор;
- организация анализа эффективности и надежности работы отдельных компонентов экскаватора.

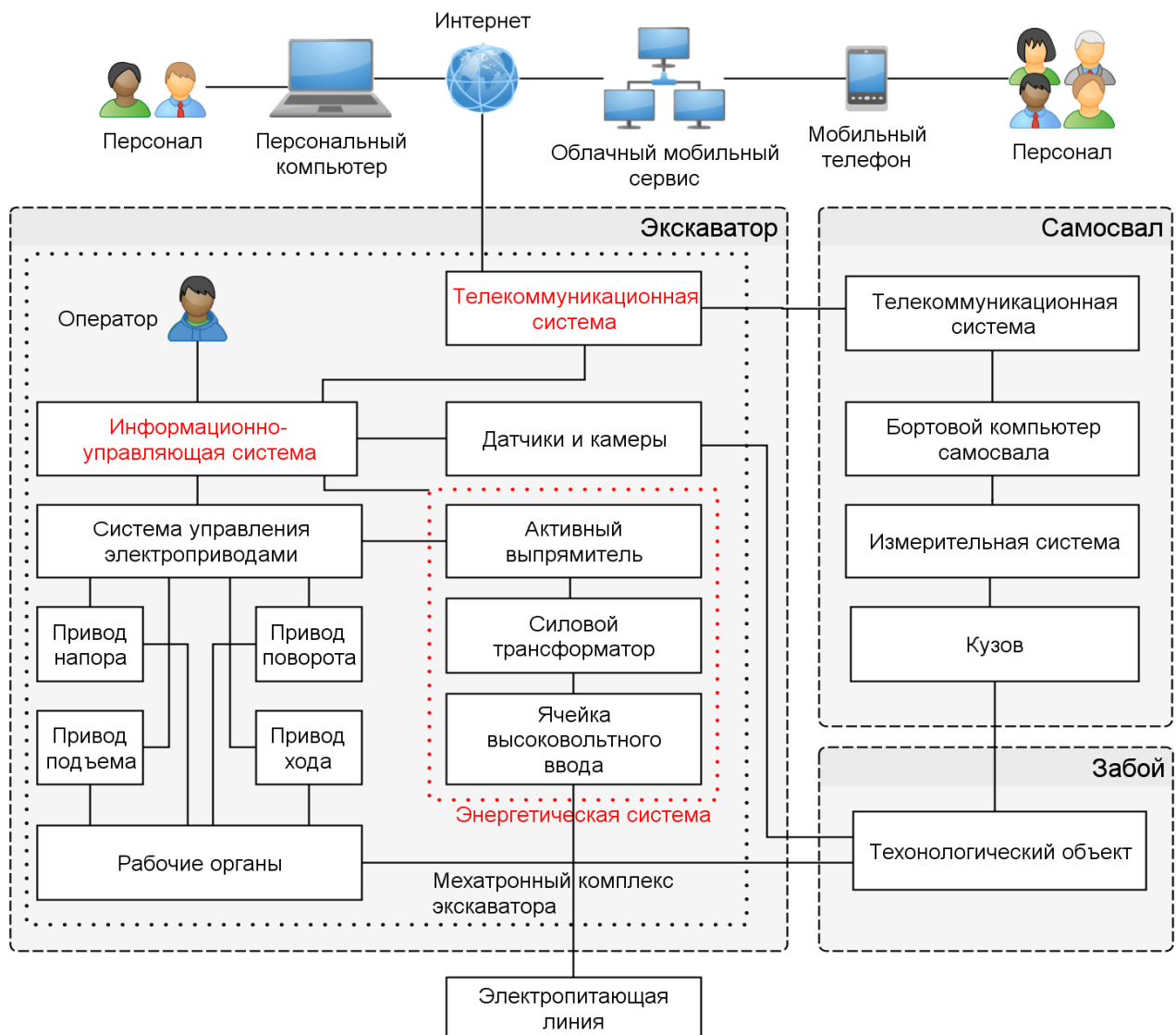


Рисунок 2.1 – Структурная схема мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора

Предлагается создание информационно - управляющей системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора по принципу децентрализованной вычислительной сети, включающей в себя систему управления электроприводами главного движения, центральный сервер ИС, телекоммуникационное оборудование, и локальные информационно - диагностические модули, устанавливаемые на основных компонентах мехатронного комплекса экскаватора.

Основной особенностью аппаратной реализации мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора по сравнению с мехатронным комплексом обычного карьерного экскаватора является организация ЕИП [72, 73] – неотъемлемой части интеллектуального горного производства.

2.2. Функции интеллектуального мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Интеллектуализация мехатронного комплекса экскаватора предполагает наделение машины следующими функциями:

- организация информационного взаимодействия карьерного экскаватора в рамках ЕИП [34] с другими машинами, а также персоналом горного предприятия и проектной организации;
- интеллектуальная обработка и анализ данных информационно - диагностической системы экскаватора с целью определения состояния, ресурса и эффективности работы машины и ее отдельных компонентов и дальнейшего размещения этой информации в ЕИП;
- контроль факторов окружающей среды (транспорта, электроэнергетической системы и горно-геологических условий);
- информационная поддержка машиниста, позволяющая ему после завершения смены получить отчет об эффективности работы экскаватора и рекомендации по ее повышению;
- коррекция действий машиниста в процессе работы;

- накопление данных об истории эксплуатации мехатронного комплекса экскаватора в ЕИП с целью использования полученного опыта для улучшения его характеристик;
- адаптация оборудования к особенностям питающей сети и сезону года;

Реализация описанных выше функций мехатронного комплекса карьерного экскаватора предполагает интеллектуальный анализ данных (ИОД).

Интеллектуальный анализ данных – исследование и обнаружение «машиной» (алгоритмами, средствами искусственного интеллекта) в сырых данных скрытой информации, которая ранее не была известна, нетривиальна, практически полезна, доступна для интерпретации [71].

При практической реализации алгоритмов ИОД применяются различные методы обработки данных информационной системы экскаватора. К основным методам ИОД относятся [71]:

- базовые методы (методы перебора и их вариации, использующие разного рода эвристики);
- логическая обработка данных;
- нейронные сети;
- генетические алгоритмы;
- экспертные системы.

Реализацию алгоритмов ИОД информационной системы мехатронного комплекса карьерных экскаваторов предлагается осуществлять на основе базовых методов перебора, логической обработки данных и нейронных сетей различных топологий.

Одной из особенностей интеллектуального мехатронного комплекса карьерного экскаватора, является гармоничное взаимодействие с системой непрерывной поддержки жизненного цикла машины.

В настоящее время системы непрерывной поддержки жизненного цикла получила широкое распространение в таких традиционно высокотехнологичных отраслях, как автомобилестроение, аэрокосмическое приборостроение и

самолетостроение [74], при этом наблюдается тенденция применения данной технологии и в других отраслях [75].

Гармоничное взаимодействие мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора с системой непрерывной поддержки жизненного цикла машины способно обеспечить:

- информационную поддержку карьера за счет организации удаленного доступа к информационной системе мехатронного комплекса экскаватора специалистами завода-изготовителя с возможностью автоматизированного анализа данных;
- возможность выполнения научно-исследовательских работ без необходимости выезда специалистов на карьер и размещения дополнительного оборудования на экскаваторе за счет применения телекоммуникационных систем, обеспечивающих передачу реальных показателей, характеризующих работу компонентов мехатронного комплекса экскаватора непосредственно в проектные организации.

Основной задачей интеллектуализации карьерного экскаватора является интеллектуальное высвобождение человека подобно тому, как на втором этапе развития экскаваторной техники решалась задача физического высвобождения людей за счет внедрения приводов главного движения.

Под физическим высвобождением понимается не полное отсутствие физических усилий оператора, а снижение их интенсивности до комфортного уровня при увеличении производительности труда. По аналогии, интеллектуальное высвобождение не означает, что человек-оператор перестанет думать, это означает, что это позволит ему сосредоточиться на выполнении только одной задачи – на загрузке самосвалов.

Основные функциональные возможности, обеспечивающие переход экскаватора на новый уровень приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Различия классических и современных экскаваторов

Функция	Обычный экскаватор	Интеллектуальный экскаватор
Контроль, коррекция и предупреждение ошибочных действий машиниста	Отсутствует	Автоматически
Информационное взаимодействие с другими машинами на разрезе (в рамках ЕИП)	Отсутствует	Имеется
Накопление данных о работе машины	Отсутствует	Имеется
Анализ ресурса и эффективности работы компонентов мехатронного комплекса	Отсутствует	Автоматическая
Адаптация к особенностям питающей сети	Отсутствует	Автоматическая
Дистанционное управление	Отсутствует	Возможно
Проведение НИР	Требует физического вмешательства в работу экскаватора	Автоматизировано

2.3. Разработка архитектуры интеллектуальной информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Для решения задач контроля, диагностики и анализа работы мехатронного комплекса экскаватора разработаны системы «Электронный машинист» и «Виртуальный экскаватор».

Система «Электронный машинист» – специальная программная система постоянного контроля работы экскаватора и его отдельных компонентов и формирования объективных данных обо всех системах экскаватора, включая машиниста, об окружающей среде и системе электропитания. Система «Электронный машинист» – это аналитический наблюдатель за работой экскаватора и его подсистем в течение всего жизненного цикла машины. Программный комплекс системы «Электронный машинист» выполняет обработку сигналов из ИДС и анализ процессов, состояния оборудования и действий машиниста, на основе анализа формирует данные о работе машины, отражающие историю, состояние и прогноз ресурса компонентов. Оперативные данные поступают из ИДС и преобразуются по специальным алгоритмам для удобного

восприятия и эффективного анализа аварийных ситуаций, оперативного контроля состояния оборудования и электропитающей сети. Данные выводятся на монитор и сохраняются на сервере. Важная для оценки работы информация запоминается в программных модулях и обрабатывается с целью анализа эффективности работы экскаватора и оценивания его надежности. В процессе работы производится регистрация основных процессов, изменения состояния оборудования, протоколов аварий и др. Данные хранятся на сервере и передаются в центр. Срок хранения записей зависит от вида процесса и типа оборудования. В процессе работы экскаватора, в частности, производится:

- анализ динамических и статических характеристик экскаватора;
- оценивание энергетических характеристик;
- анализ электроэнергетических процессов в питающей сети.

Предусматривается:

- автоматическая коррекция настроечных параметров приводов, формирование рекомендаций по настройке, переключение программ;
- формирование рекомендаций по замене или ремонту компонентов на основании исчерпания ресурса;

«Виртуальный экскаватор» – система удаленного наблюдения за работой экскаватора и всех его компонентов. Обеспечивает объединение отдельных фрагментов в единые информационные поля для машин, добывающих предприятий и изготовителей машин. Важным аспектом системы «Виртуальный экскаватор» является расчет и визуализация данных на удаленном компьютере (или ином устройстве), ведь посредством сети Internet на него передается не видеопоток, а лишь набор данных, характеризующих работу экскаватора [76].

Система «Виртуальный экскаватор» обеспечивает обратную связь между горным и проектным предприятиями, при этом сотрудники проектного предприятия могут удаленно производить оценку эффективности использования компонентов мехатронного комплекса экскаватора и учитывать это при производстве новых и модернизации старых экскаваторов.

Современные информационно - диагностические системы имеют структуру топологии «общая шина» или «звезда», центральным элементом которой, является компьютер, производящий все необходимые вычисления. При такой структуре датчики, размещенные на диагностируемом оборудовании, передают результаты измерений на концентраторы, а те, в свою очередь, передают полученные данные на вычислительное устройство (компьютер). ИС подобной структуры мы будем называть централизованными. Пример централизованной ИС приведен на рисунке 2.2.

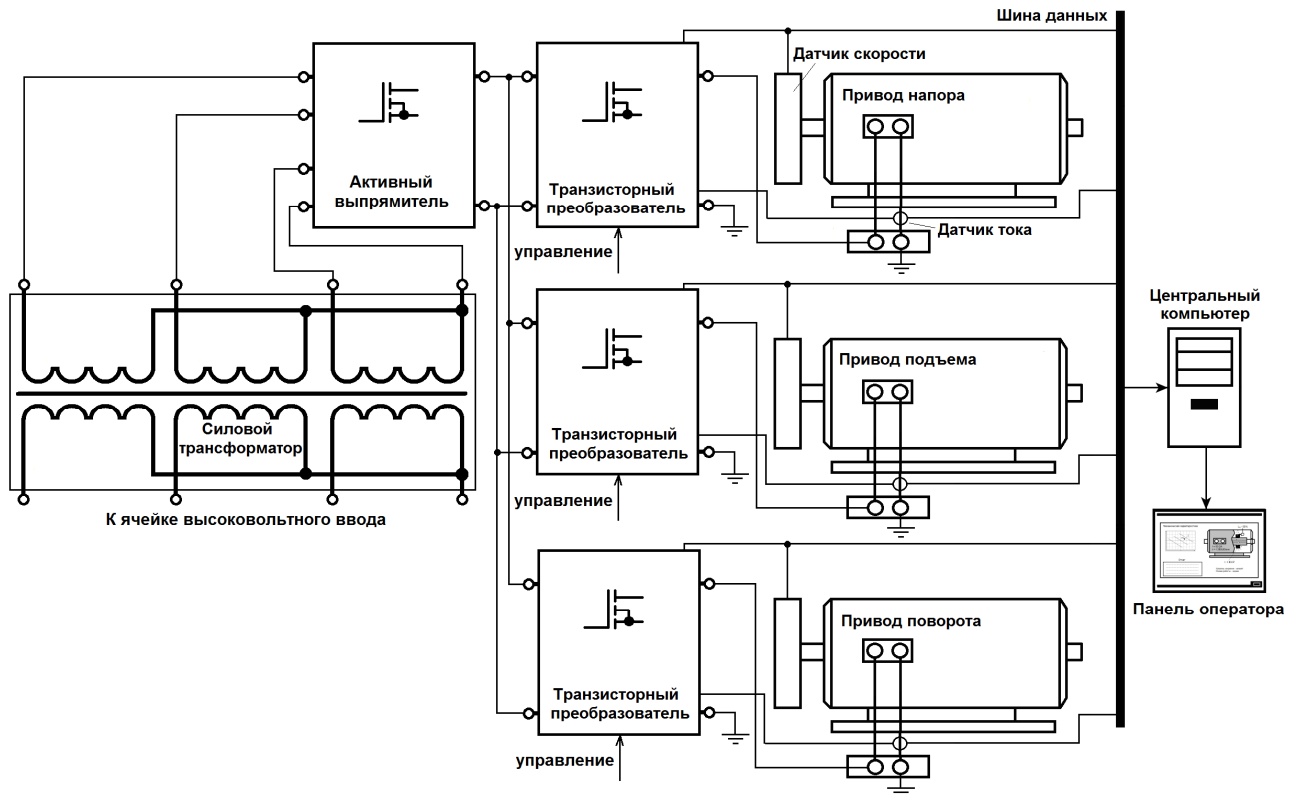


Рисунок 2.2 – Структура централизованной информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора

При реализации концепции ИЭ предлагается применить информационно - диагностические модули (ИДМ) – электронные устройства, собирающие показания одновременно нескольких датчиков и самостоятельно обеспечивающие контроль и диагностику объекта измерения (схожая идея изложена в работе Г.И. Бабокина [77]).

ИС уровня АСУ ТП может включать в себя множество ИДМ. При этом ее структура представляет собой распределенную вычислительную сеть. Упрощенный пример подобной структуры приведен на рисунке 2.3.

Рассмотрим основные вопросы, вытекающие из необходимости взаимодействия подсистем интеллектуального экскаватора при использовании децентрализованного подхода к организации систем.

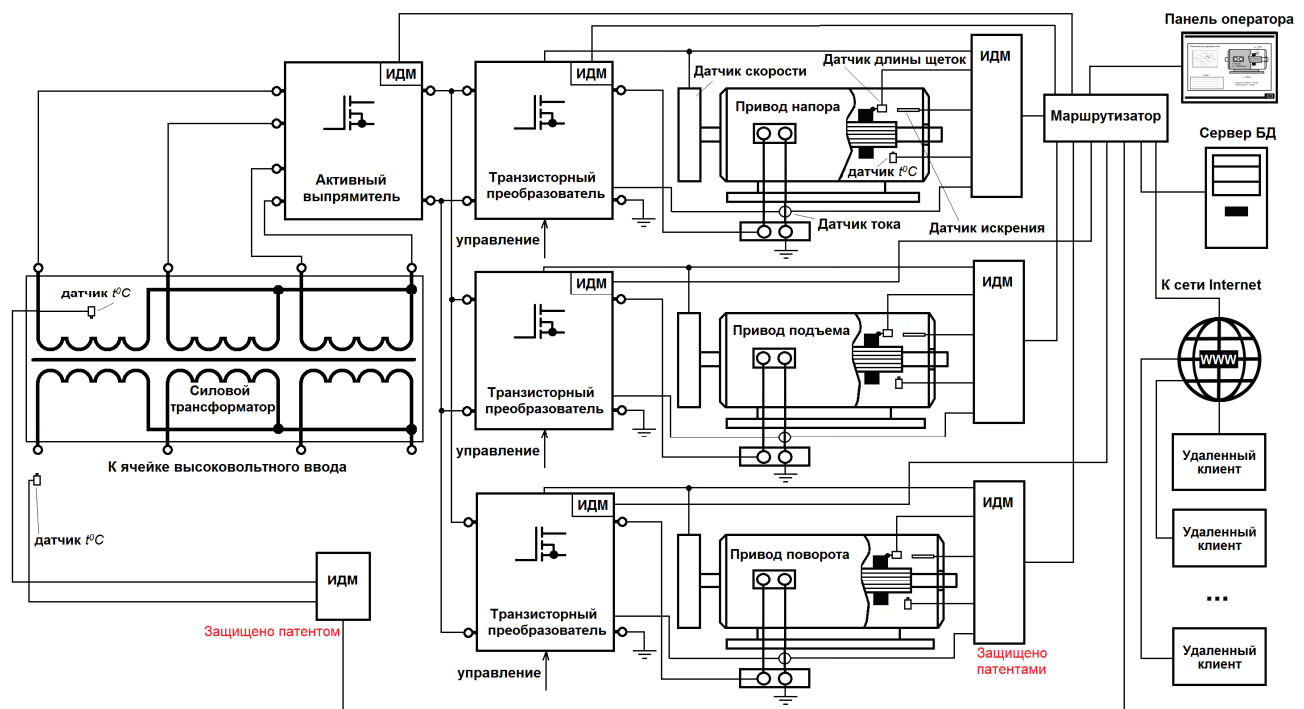


Рисунок 2.3 – Структура распределенной информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Во-первых, децентрализация системы обработки данных направлена на сокращение потоков информации между подсистемами. Таким образом, непосредственно на подсистему уровня АСУ ТП передаются лишь уведомления об изменении состояний оборудования. При этом интеллектуальное программное обеспечение, находящееся на подсистеме уровня АСУ ТП, анализирует такие уведомления и, при необходимости, отправляет на подсистемы более низкого уровня запросы на получение расширенного набора данных, такие наборы, к примеру, могут включать в себя показания всех датчиков каждой подсистемы за определенный интервал времени. Такой набор данных, очевидно, значительно

объемнее, нежели уведомления об изменении состояния подсистем, однако он запрашивается лишь при возникновении реальной необходимости. Такой подход позволяет значительно сократить объемы данных, передаваемых по локальной сети интеллектуального экскаватора и, как следствие, сокращает время их обработки, при этом, данный показатель является основным для ИС реального времени.

Во-вторых, при уменьшении потока информации, возрастает и его ценность, что приводит к необходимости повышения надежности канала связи. По данному направлению может быть выделено несколько взаимодополняющих подходов, а именно:

- применение сетевых протоколов, гарантирующих доставку пакетов данных в режиме реального времени;
- применение помехозащищенного кодирования данных с автокоррекцией;
- использование алгоритмов вычисления хэш-сумм, позволяющих удостовериться в том, что полученные данные эквивалентны переданным;
- применение систем самодиагностики линий передачи информации, с функцией организации альтернативных маршрутов транзита данных.

В-третьих, все компоненты мехатронного комплекса экскаватора, объединенные в ЕИП посредством локальной сети, подвержены угрозам извне [64, 78]. Компьютеры уровней АСУ ТП и АСУП взаимодействуют с глобальной сетью Internet. К основным угрозам относятся:

- компьютерные вирусы, способные нарушить работу АСУ;
- перехват потока данных между АСУ ТП и АСУП посредством, например, руткитов или снифферов.

Для борьбы с компьютерными вирусами и руткитами, используется специализированное антивирусное программное обеспечение. Для борьбы со сниффингом необходимо обеспечить шифрование данных передаваемых между АСУ ТП и АСУП, одним из наиболее простых способов сделать это является

организация защищенного SSH-туннеля между этими узлами. Альтернативным подходом является организация VPN соединения [63], либо непосредственное шифрование/дешифрование данных посредством специального ПО с применением алгоритмов DES или RSA.

Рассмотрим ПО интеллектуальной обработки данных. В простейшем случае оно представляет собой набор логических правил, с помощью которого сначала анализируются уведомления об изменении состояния оборудования, поступающие от АСУ более низкого уровня. Если не выполняется одно из условий нормальной работы оборудования, система сигнализирует об этом оператору, в это же время, система запрашивает от АСУ проблемного элемента дополнительную информацию и процесс анализа продолжается до тех пор, пока не случится одно из трех событий:

- система обнаружит причину неисправности и в автоматическом режиме устранит ее (например, посредством внесения корректировок в работу АСУ проблемного компонента мехатронного комплекса экскаватора), а затем предоставит оператору отчет о проделанной работе;
- система обнаружит причину неисправности, однако в силу технических ограничений, не сможет исправить ее, в этом случае она проинформирует об этом оператора и он сам примет решение о дальнейших действиях;
- система не найдет причину неисправности, в этом случае она проинформирует об этом оператора и дополнительно уведомит специалиста технической поддержки (на уровне АСУП) о необходимости привлечения эксперта для разрешения сложившейся проблемы.

В более сложном варианте, для анализа данных предлагается использовать нейронные сети.

Применительно к ИЭ с распределенной информационной системой, ЕИП включает в себя:

- локальные ИДМ;

- ЭВМ уровней АСУ ТП и АСУП;
- локальные серверы баз данных;
- коммутаторы, концентраторы, маршрутизаторы;
- интерфейсные устройства (сетевые карты, беспроводные точки доступа);
- Internet-модемы, файерволы, VPN-серверы;
- среду передачи данных (сетевые кабели, антенны и т.д.)

2.4. Математические модели компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Информационно - диагностические модули мехатронного комплекса карьерного экскаватора обеспечивают формирование единого информационного поля, хранящего и обеспечивающего доступ ко всем основным показателям мехатронного комплекса карьерного экскаватора. К таким показателям относятся:

- температура подшипников двигателей, обмоток двигателей и трансформаторов, окружающей среды, радиаторов систем охлаждения, смазки и др.;
- токи, напряжения и мощности на вводе экскаватора, на выходных обмотках силовых трансформаторов, на обмотках двигателей и др. компонентов;
- сопротивление изоляции обмоток двигателей и трансформаторов [79];
- активное и реактивное сопротивление электропитающей линии;
- потребление электроэнергии мехатронным комплексом экскаватора с учетом коэффициента мощности;
- скорости вращения двигателей;
- положение рабочих органов относительно экскаватора, автосамосвала и забоя;
- сигналы концевых датчиков состояния дополнительного оборудования: положение лестницы, положение дверцы кабины и др.;

- положение (отслеживается по GPS/ГЛОНАС) и углы наклона (по инклинометрам) экскаватора;
- искрение щеток ДПТ;
- показатели эффективности работы экскаватора: количество загруженных самосвалов, среднее количество ковшей, необходимых для загрузки одного экскаватора, время работы, время простоя, энергия, затраченная при простое, энергия затраченная при работе и др.;
- ресурс компонентов мехатронного комплекса, таких, как щетки ДПТ, изоляция обмоток двигателей и силовых трансформаторов, автоматических выключателей и др.

В настоящей работе решена задача определения ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, с этой целью в работе предложены новые математические модели истощения ресурса ряда компонентов. Использование этих моделей на практике обеспечивает возможность определения ресурса в режиме реального времени средствами информационно - диагностических модулей.

В работе предложены математические модели истощения ресурса следующих компонентов мехатронного комплекса:

- щеток двигателей постоянного тока;
- изоляции обмоток силовых трансформаторов;
- автоматических выключателей.

Износ щеток определяется двумя составляющими – механической и электрической. Механический износ щеток вызывается трением истирания или «отрыва» частиц с поверхности контакта. Трение пропорционально силе перпендикулярной к поверхности контакта. В случае, если эта сила постоянна, механический износ щеток пропорционален интегралу от угловой скорости ротора электрической машины.

Электрический износ является результатом сопротивления скольжению между углеродной щеткой и контактной поверхностью. Если окисная пленка

загрязнена пылью, маслом, частицами дыма или коррозионно-активными веществами (причем все они обладают плохой проводимостью), контактное сопротивление щетка – коммутатор увеличивается. Отделение щетки от поверхности контакта прослойкой воздуха, обладающего высоким сопротивлением, является наиболее очевидным условием причины износа и электрической дуги. Независимо от причины, протекание тока через высокое сопротивление приведет к высокой энергии, высокой температуре разрушительной дуги и, тем самым, к быстрому износу щетки и контактной поверхности. Степень износа непосредственно связана с потерями $i^2 R$ в переходном сопротивлении щетка - коллектор. Важно отметить, что в то время как механическое изнашивание является главной причиной истирания материала щетки, износ также состоит в эрозии как щетки, так и контактной поверхности. Поэтому электрический износ может вызвать более серьезные проблемы, вплоть до пробоев и прогорания с высокой стоимостью ущерба.

Другой причиной износа щеток является недостаточная нагрузка машины. Если машина загружена недостаточно, температура ротора остается невысокой. То же самое происходит в случае интенсивного обдува при нормальной нагрузке. В таких случаях патина является плохо проводящей, и передача тока осуществляется, главным образом, по перемычкам спекания. Температура в этих маленьких перемычках настолько высока, что металл ротора начинает испаряться, и тончайшие металлические частицы оседают на поверхности щеток, и выглядят они как, так называемые, медные «узелки». Коэффициент трения при этом увеличивается [80]. Причиной образования бороздок являются катодные щетки, поскольку для возбуждения ионов меди играет роль направление электрических полей.

Ниже представлена разработанная математическая модель истощения ресурса щеток двигателя постоянного тока

$$T(\tau) = T_0 - k_1 \int_0^{\tau} \Omega(t) dt - k_2 \int_0^{\tau} i^2(t) dt - k_3 \int_0^{\tau} e^{\frac{i(t)-i_0}{i_0}} dt;$$

Здесь $T(\tau)$ – ресурс щеток в момент времени τ , T_0 – номинальный ресурс щеток, k_1 , k_2 и k_3 – весовые коэффициенты, равные расчетным коэффициентам ресурсного изнашивания щеток, $\Omega(t)$ – скорость вращения ротора в момент времени t , $i(t)$ – значение тока машины в момент времени t , i_0 – ток холостого хода машины.

В приведенной формуле для вычисления остаточного ресурса слагаемые в правой части имеют следующий смысл:

- T_0 – полный номинальный ресурс работы щеток, соответствующий техническим условиям;

- $k_1 \int_0^{\tau} \Omega(t) dt$ – составляющая, характеризующая механическое изнашивание щеток;

- $k_2 \int_0^{\tau} i^2(t) dt$ – составляющая, характеризующая электрическое изнашивание щеток;

- $k_3 \int_0^{\tau} e^{\frac{i(t)-i_0}{i_0}} dt$ – составляющая, характеризующая изнашивание щеток при малых токах.

- k_1 – коэффициент, характеризующий механический износ щетки вследствие трения при движении коллектора относительно щетки. Он определяется в соответствии с ГОСТом Р МЭК 773-96 и равен средней интенсивности линейного износа щеток (отношению линейного износа к длине пройденного щеткой пути по поверхности скольжения, м/м). Количественные данные интенсивности износа указываются в технических данных щеток и справочной литературе [80];

- k_2 – коэффициент, характеризующий электрический износ щетки вследствие протекания тока и коммутации. Износ щетки зависит от удельной мощности, выделяющейся на единицу длины края щетки, и характеризуется

показателем коммутационной напряженности машины. Приближенно этот коэффициент определяется по формуле:

$$k_2 = \frac{1}{I_n^2 T_n} \left(\frac{e_k}{e_{k0}} - 1 \right) \quad (2.1),$$

где e_k - показатель коммутационной напряженности машины [81]; e_{k0} - минимальное значение показателя коммутационной напряженности; I_n - номинальный ток якорной обмотки; T_n - номинальный срок службы щеток. В соответствии с формулой (2.1) при минимальной коммутационной напряженности электрический износ щеток практически отсутствует. При увеличении коммутационной напряженности износ щеток возрастает в 3...10 раз по сравнению с обычным механическим износом;

- k_3 - коэффициент, характеризующий износ щетки вследствие увеличения коэффициента трения при малых токах. Он приближенно определяется как произведение коэффициента интенсивности износа щеток $k_{и}$ (м/с или мм/час) на разность коэффициента трения при токе холостого хода и номинальном токе Δk_t , т.е. $k_3 = k_{и} \Delta k_t$. Коэффициент $k_{и}$, характеризующий механический износ щеток при работе двигателя определяется по справочным данным [80]. Величина Δk_t определяется также по справочным данным [80].

При разработке модели истощения ресурса обмоток силового трансформатора, помимо теплового разрушения изоляции (которое учитывается согласно ГОСТу), дополнительно учтено ее термомеханическое разрушение.

Ниже представлена разработанная модель истощения ресурса обмоток силового трансформатора:

$$T(\tau) = T_0 - k_1 \int_0^t e^{\mu(\theta_n - \theta_n^0)} dt - k_2 n(\tau),$$

где T_0 - полный номинальный ресурс изоляции трансформатора, k_1 и k_2 - весовые коэффициенты, равные расчетным коэффициентам ресурсного износа изоляции трансформатора, $\mu = 0,116$ - коэффициент пропорциональности, характеризующий температурный износ, $\theta_H = 98^\circ C$, θ_{II} - температура наиболее

нагретой точки трансформатора, $n(\tau)$ – количество циклов нагрева-остывания обмоток трансформатора за время τ .

Для вычисления остаточного ресурса, слагаемые в правой части имеют следующий смысл:

- T_0 – полный номинальный ресурс работы трансформатора, соответствующий техническим условиям;

- $k_1 \int_0^t e^{\mu(\theta_n - \theta_{n-1})} dt$ – составляющая, характеризующая тепловое разрушение изоляции обмоток трансформатора;

- $k_2 n(\tau)$ – составляющая, характеризующая механическое изнашивание изоляции обмоток трансформатора.

Физический ресурс АВ при его работе расходуется в результате изнашивания механических и электрических компонентов при воздействии протекающих токов, механических ударных нагрузок и электромеханических коммутационных процессов при отключениях. Интенсивность изнашивания определяется энергией воздействия на выключатель и может быть представлена суммой двух составляющих: электромеханической – при отключениях, и электрической – при протекании тока в рабочем режиме. Электромеханическая составляющая изнашивания возникает при отключениях и зависит от величины разрываемого тока при коммутации. Электрическая составляющая изнашивания пропорциональна тепловым потерям и, следовательно, интегралу от квадрата тока.

Ниже представлена модель исчерпания ресурса силового трансформатора:

$$T(t) = T_0 - \sum_{j=1}^n k_1(i_j) - k_2 \int_0^t i^2 dt,$$

где T_0 – полный ресурс АВ, k_2 – коэффициент пропорциональности, равный расчетному коэффициенту ресурсного изнашивания АВ, t – время работы АВ от начала эксплуатации, n – общее число срабатываний АВ от начала эксплуатации.

Для вычисления остаточного ресурса автоматического выключателя слагаемые в правой части имеют следующий смысл:

T_0 – полный номинальный ресурс работы автоматического выключателя (количество коммутаций), соответствующий техническим условиям;

- $\sum_{j=1}^n k_1(i_j)$ – составляющая, характеризующая электромеханическое

изнашивание автоматического выключателя;

- $k_2 \int_0^t i^2 dt$ – составляющая, характеризующая электрическое изнашивание

автоматического выключателя;

- $k_1(i_j)$ – коэффициент, характеризующий механический износ автоматического выключателя вследствие разрыва токовой цепи при срабатывании. Он определяется в соответствии с ГОСТом Р 52565-2006 и равен отношению регламентированного количества коммутаций без нагрузки к количеству коммутаций при токе i_j .

$$k_1(i_j) = \frac{T_0}{T(i_j)}.$$

Количественно данные относительно результата указываются в технических данных автоматических выключателей и справочной литературе;

- k_2 – коэффициент, характеризующий электрический износ автоматического выключателя вследствие протекания тока в процессе работы. Износ автоматического выключателя зависит от мощности, выделяющейся на замкнутых контактах. Приблизительно этот коэффициент определяется по формуле:

$$k_2 = \frac{1}{T_0 I_n^2 t},$$

где I_n – номинальный ток автоматического выключателя.

Еще одной задачей, решенной в настоящей работе, является задача определения активного и реактивного сопротивлений линии электропередачи

питающей экскаватор, с этой целью разработана математическая модель электропитающей системы.

На рисунке 2.4 приведены векторные диаграммы токов и напряжений в узле нагрузки в режиме потребления (а) и рекуперации (б) электрической энергии.

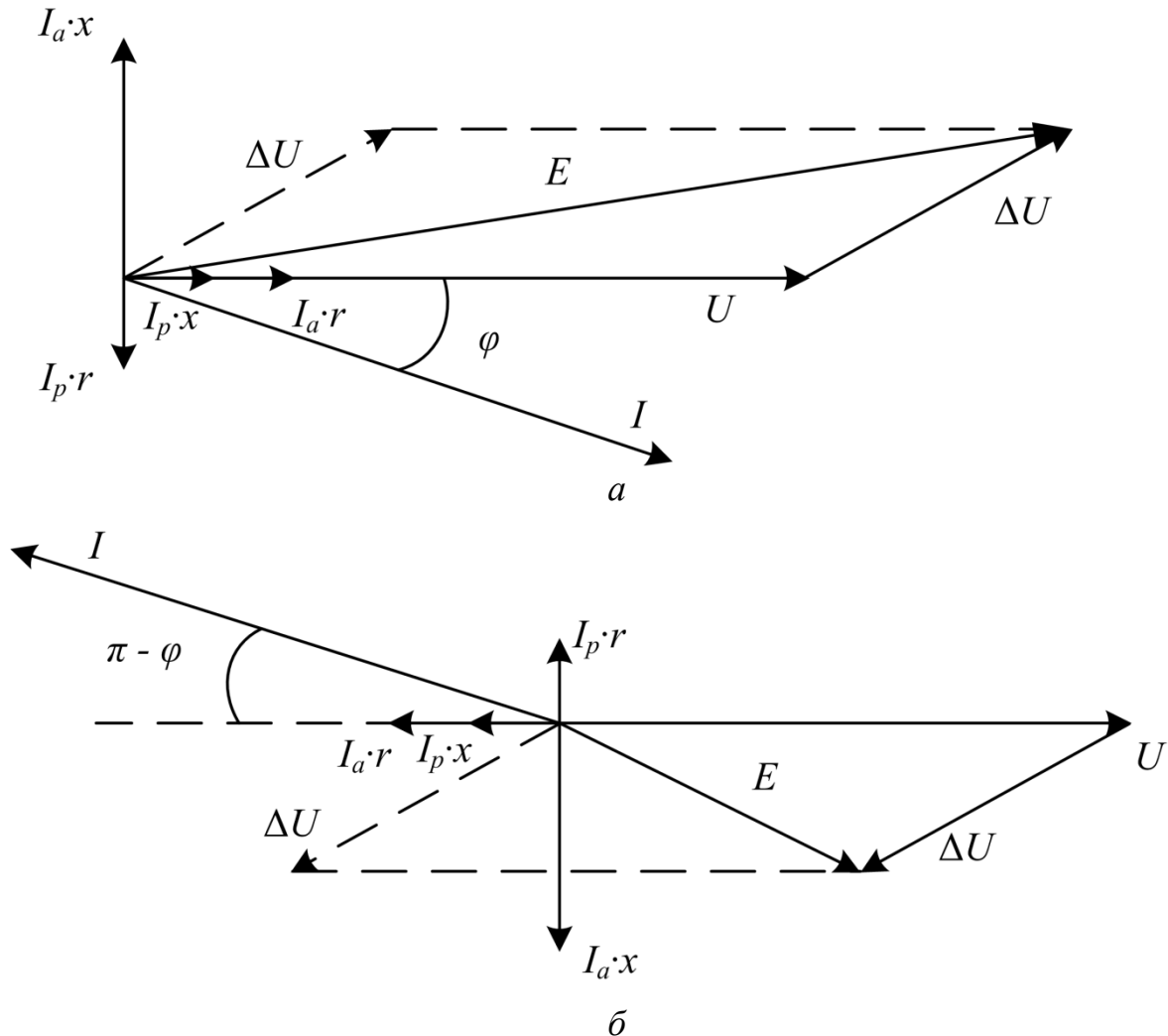


Рисунок 2.4 – Векторные диаграммы токов и напряжений в узле нагрузки экскаватора, (а) – в режиме потребления, (б) – в режиме рекуперации

На основании векторных диаграмм, приведенных на рисунке 2.4 можно составить уравнения:

- для режима $I_0 \approx 0$:

$$U = E; \Delta U = 0; \quad (2.2)$$

- для режима потребления электроэнергии:

$$E^2 = (U + rI_a + xI_p)^2 + (rI_p - xI_a)^2; \quad (2.3)$$

- для режима рекуперации электроэнергии:

$$E^2 = (U - rI_a - xI_p)^2 + (rI_p - xI_a)^2, \quad (2.4)$$

где I_a - активная составляющая тока, $I_a = I \cos \varphi$; I_p - реактивная составляющая тока, $I_p = I \sin \varphi$.

Совместное решение уравнений (2.3) и (2.4) с учетом соотношения (2.2) позволяет получить значения r и x линии (2.5):

$$\begin{cases} U_0^2 = (U_1 + rI_1 \cos \varphi_1 - xI_1 \sin \varphi_1)^2 + (rI_1 \sin \varphi_1 + xI_1 \cos \varphi_1)^2; \\ U_0^2 = (U_2 - rI_2 \cos \varphi_2 + xI_2 \sin \varphi_2)^2 + (rI_2 \sin \varphi_2 + xI_2 \cos \varphi_2)^2. \end{cases} \quad (2.5)$$

(2.5) – это математическая модель электропитающей системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора.

Погрешность совокупного измерения параметров линии определяется суммарной погрешностью датчиков (трансформаторов тока и напряжения), АЦП и вычислительного метода. С целью упрощения расчетов, предполагается, что напряжение на вводе экскаватора имеет строго синусоидальную форму, а угловая погрешность трансформатора тока полностью скомпенсирована угловой погрешностью трансформатора напряжения. Погрешности измерительных трансформаторов тока напряжения определяются их классами точности. Погрешность квантования АЦП определяется его разрядностью. Наибольший интерес представляет анализ погрешности, обусловленной численным методом (в качестве которого был выбран метод простых итераций).

Выполним оценку погрешностей при использовании метода простых итераций для решения системы уравнений (2.5). В этом случае поиск решения (2.5) выполняется с помощью итерационной процедуры

$$r_{i+1} = \frac{U_0^2 - U_1^2 - (r_i I_{1a})^2 - (x_i I_{1a})^2 - (r_i I_{1p})^2 - (x_i I_{1p})^2 + 2U_1 I_{1p} x_i}{2I_{1a} U_1}; \quad (2.6)$$

$$x_{i+1} = \frac{U_0^2 - U_2^2 - (r_i I_{2a})^2 - (x_i I_{2a})^2 - (r_i I_{2p})^2 - (x_i I_{2p})^2 + 2U_2 I_{2a} r_i}{2I_{2p} U_2}. \quad (2.7)$$

Погрешность вычисления активного и индуктивного сопротивлений линии определим по приближенным формулам [82]:

$$\Delta r_{i+1} \approx \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial U_0} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial U_1} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial I_{1a}} \Delta I_{1a}\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial I_{1p}} \Delta I_{1p}\right)^2}; \quad (2.8)$$

$$\Delta x_{i+1} \approx \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial U_0} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial U_2} \Delta U_2\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial I_{2a}} \Delta I_{2a}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial I_{2p}} \Delta I_{2p}\right)^2}, \quad (2.9)$$

где $\frac{\partial r}{\partial U_0}$; $\frac{\partial r}{\partial U_1}$; $\frac{\partial r}{\partial I_{1a}}$; $\frac{\partial r}{\partial I_{1p}}$ - частные производные функции активного сопротивления по переменным, влияющим на погрешность;

$\frac{\partial x}{\partial U_0}$; $\frac{\partial x}{\partial U_2}$; $\frac{\partial x}{\partial I_{2a}}$; $\frac{\partial x}{\partial I_{2p}}$ - частные производные функции реактивного сопротивления по переменным, влияющим на погрешность;

ΔU_0 , ΔU_1 , ΔU_2 , ΔI_{1a} , ΔI_{2a} , ΔI_{1p} , ΔI_{2p} - погрешности измерения напряжения и составляющих тока.

Частные производные в формулах (2.8) и (2.9) равны:

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial U_0} &= \frac{U_0}{U_1 I_{1a}}; \\ \frac{\partial r}{\partial U_1} &= \frac{-U_0^2 - U_1^2 + x^2(I_{1a}^2 + I_{1p}^2) + r^2(I_{1a}^2 + I_{1p}^2)}{2U_1^2 I_{1a}} \approx -\frac{U_0^2 + U_1^2}{2U_1^2 I_{1a}}; \\ \frac{\partial r}{\partial I_{1a}} &= \frac{-U_0^2 + U_1^2 - I_{1a}^2(r^2 + x^2) + I_{1p}^2(x^2 + r^2) - 2xU_1 I_{1p}}{2U_1 I_{1a}^2}; \\ \frac{\partial r}{\partial I_{1p}} &= -\frac{I_{1p}(x^2 + r^2) - xU_1}{U_1 I_{1a}} \approx \frac{x}{I_{1a}}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial x}{\partial U_0} = \frac{U_0}{U_2 I_{2p}};$$

$$\frac{\partial x}{\partial U_2} = \frac{-U_0^2 - U_2^2 + x^2(I_{2a}^2 + I_{2p}^2) + r^2(I_{2a}^2 + I_{2p}^2)}{2U_2^2 I_{2p}} \approx -\frac{U_0^2 + U_2^2}{2U_2^2 I_{2p}};$$

$$\frac{\partial x}{\partial I_{2a}} = -\frac{I_{2a}(x^2 + r^2) - rU_2}{U_2 I_{2p}} \approx \frac{r}{I_{2p}};$$

$$\frac{\partial x}{\partial I_{2p}} = \frac{-U_0^2 + U_2^2 - I_{2p}^2(x^2 + r^2) + I_{2a}^2(x^2 + r^2) - 2rU_2 I_{2a}}{2U_2 I_{2p}^2}.$$

После подстановки приближенных выражений для частных производных в уравнения (2.8) и (2.9) с учетом соотношений $\frac{\partial r}{\partial I_{1a}} \ll \frac{\partial r}{\partial I_{1p}}$ и $\frac{\partial x}{\partial I_{2p}} \ll \frac{\partial x}{\partial U_0}$ будем иметь:

$$\Delta r_{i+1} \approx \sqrt{\left(\frac{U_0}{U_1 I_{1a}} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{U_0^2 + U_1^2}{2U_1^2 I_{1a}} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{x}{I_{1a}} \Delta I_{1p}\right)^2}; \quad (2.10)$$

$$\Delta x_{i+1} \approx \sqrt{\left(\frac{U_0}{U_2 I_{2p}} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{U_0^2 + U_2^2}{2U_2^2 I_{2p}} \Delta U_2\right)^2 + \left(\frac{r}{I_{2p}} \Delta I_{2a}\right)^2}. \quad (2.11)$$

Из уравнений (2.10) и (2.11) следует, что основное влияние на погрешность измерения активного и реактивного сопротивлений оказывает погрешность измерения напряжения. На рисунках 2.5 – 2.6 показаны графики зависимостей погрешностей определения активного и индуктивного сопротивлений от зафиксированных значений токов, используемых при вычислениях, при использовании датчиков тока класса точности 1,0 и различных классах точности датчиков напряжения.

При параметрах, соответствующих допустимой потере напряжения 8% в сети 6 кВ и токах, потребляемых карьерными экскаваторами, полученные оценки для погрешностей измерения активного и реактивного сопротивлений линии (2.10) и (2.11) дают значения погрешностей в диапазоне от 2% до 5% при

использовании первичных преобразователей напряжения класса точности 0,2 и в диапазоне от 7% до 10% при использовании первичных преобразователей класса точности 0,5.

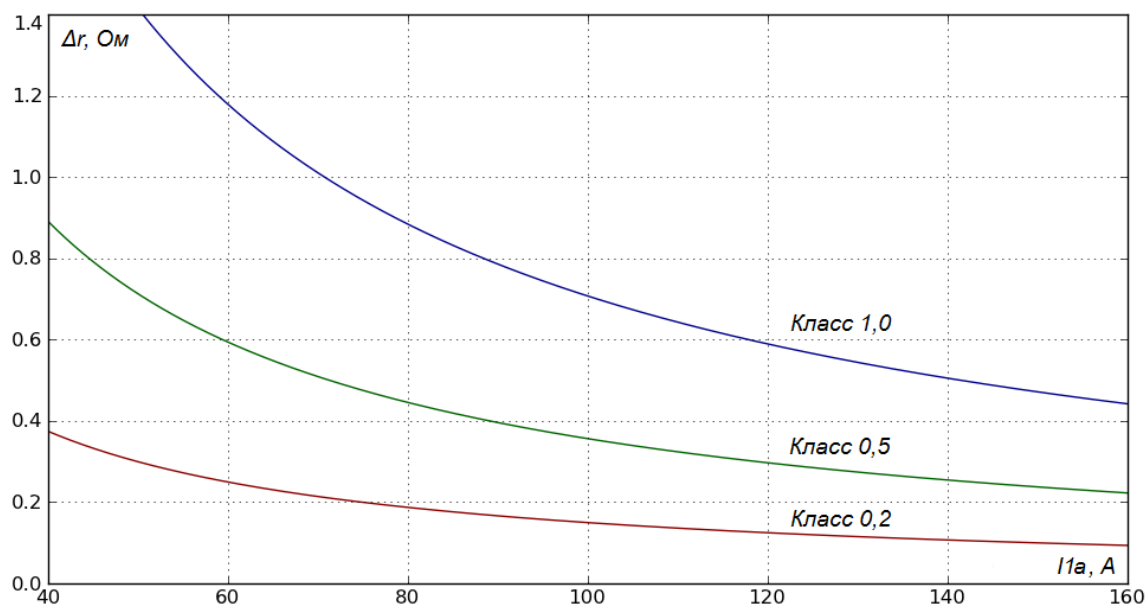


Рисунок 2.5 – Зависимость погрешности измерения активного сопротивления ЭЛ от величины активного тока в режиме потребления при различных классах точности измерительных преобразователей напряжения

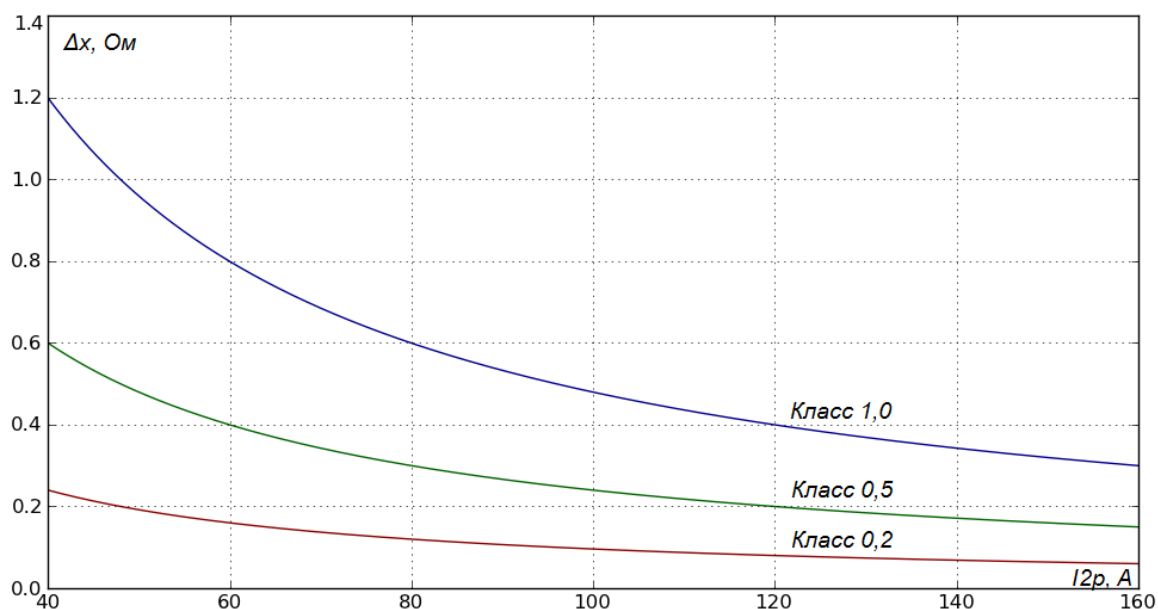


Рисунок 2.6 – Зависимость погрешности измерения реактивного сопротивления ЭЛ от величины реактивного тока в режиме рекуперации при различных классах точности измерительных преобразователей напряжения

С целью подтверждения корректности и эффективности предлагаемой методики в среде *Matlab* составлена упрощенная модель электрической системы электропитания экскаватора (рисунок 2.7). В качестве источника электропитания (трансформаторная подстанция) используется источник переменного напряжения с действующим значением напряжения 6,3 кВ и частотой 50 Гц. Линия электропередачи представлена цепью из последовательно соединенных активного сопротивления и индуктивности.

Для моделирования нагрузки (экскаватора) использован управляемый источник тока (блок *Current*), параллельно соединенный с нагрузочным резистором. С целью моделирования изменения электропотребления управляющий вход источника тока подключен к выходу генератора, имитирующего процесс экскавации.

При выполнении вычислительного эксперимента были приняты следующие исходные данные: активное сопротивление линии 5,0 Ом; реактивное сопротивление линии 5,0 Ом; напряжение на подстанции 6,3 кВ, соответственно фазное значение напряжения $U_0 = 6,3/\sqrt{3} \approx 3,6$ кВ.

Значения активного и реактивного сопротивлений линии были выбраны одинаковыми, исходя из следующих соображений: индуктивное сопротивление воздушных линий напряжением выше 1 кВ составляет 0,4 Ом/км [83], в то время как активное сопротивление определяется, исходя из материала и сечения кабеля. Для питания карьерных экскаваторов используется медный кабель сечением порядка 50 мм², активное сопротивление которого при температуре +20⁰С составляет 0,37 Ом/км [83].

При имитации процесса экскавации были зарегистрированы: значение тока потребления 87,46 А и соответствующее ему фазное значение напряжения на вводе экскаватора 3001 В, фазовый сдвиг тока относительно напряжения $\varphi = -29,37^0$; значение тока рекуперации –52,77А и соответствующее ему фазное значение напряжения на вводе экскаватора 3964 В, фазовый сдвиг тока относительно напряжения $\varphi = 122,96^0$.

Вычисления по формулам (2.6) и (2.7) дают результаты: $r = 4,99 \text{ Ом}$; $x = 5,00 \text{ Ом}$.

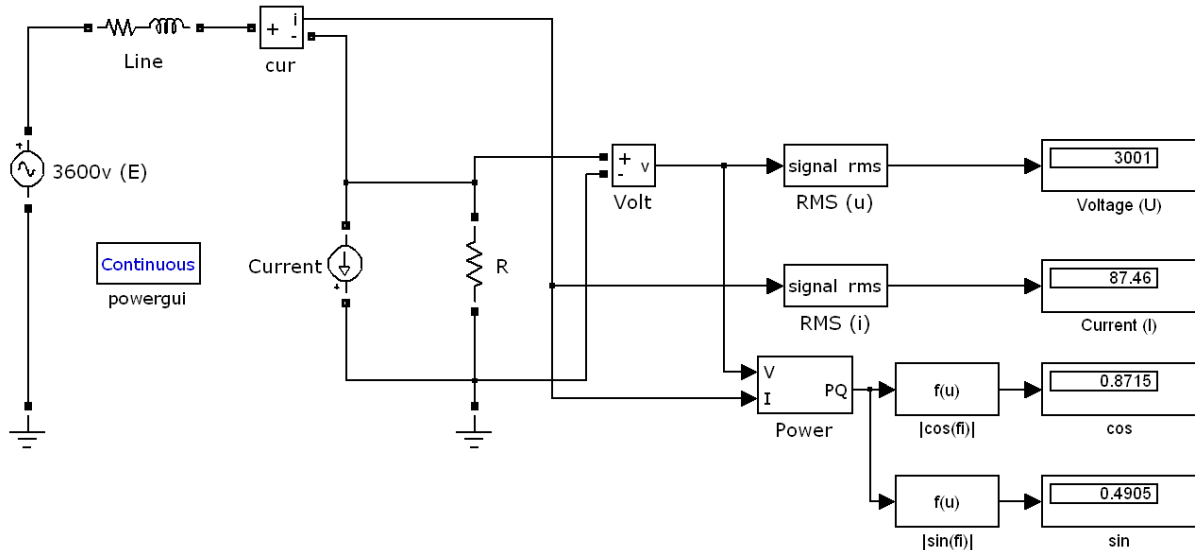


Рисунок 2.7 – Simulink-модель системы электропитания экскаватора

2.5. Выводы

1. Предложена структура интеллектуальной информационно - управляющей системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, построенная по принципу децентрализованной вычислительной сети, включающая в себя систему управления электроприводами главного движения, центральный сервер ИС, телекоммуникационное оборудование, и локальные информационно - диагностические модули, устанавливаемые на основных компонентах мехатронного комплекса экскаватора, выполняющие функции сбора, хранения, интеллектуальной обработки и информационного взаимодействия с другими компонентами системы.

2. Основными особенностями информационно - управляющей системы мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора являются: интеллектуальный анализ данных, оценка состояния и контроль ресурса оборудования, адаптация мехатронного комплекса к изменяющимся условиям

горных работ и информационное взаимодействие машин и персонала горного предприятия, а также машин и работников проектного предприятия.

3. Информационное взаимодействие компонентов мехатронного комплекса между собой, а также с внешними субъектами взаимодействия осуществляется в рамках ЕИП, построенного с применением облачных сервисов и технологии «Интернет вещей».

4. Предложена концепция организации распределенной информационной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, обеспечивающая возможность реализации систем «Электронный машинист» и «Виртуальный экскаватор».

5. Система «Электронный машинист» предназначена для постоянного мониторинга работы экскаватора и его отдельных компонентов и формирования объективных данных обо всех системах экскаватора, включая машиниста, об окружающей среде и системе электропитания.

6. Система «Виртуальный экскаватор» объединяет в единое информационное пространство машины и персонал горного и проектировочного предприятий, обеспечивая их информационное взаимодействие посредством ЛВС, сети Internet и телефонной связи с целью непрерывной информационной поддержки жизненного цикла экскаваторов.

7. Разработаны математические модели истощения ресурса щеток двигателей постоянного тока, обмоток силовых трансформаторов и автоматических выключателей.

8. Разработана математическая модель электропитающей системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, позволяющая определять активное и реактивное сопротивление линии электропередачи, питающей экскаватор.

3. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО - АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА «ЭЛЕКТРОННЫЙ МАШИНИСТ»

3.1. Функциональная организация системы «Электронный машинист»

Система «Электронный машинист» предназначена для наблюдения и последующего анализа работы мехатронного комплекса экскаватора и его подсистем в течение всего жизненного цикла машины. Программно-аппаратный комплекс системы «Электронный машинист» обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- получение данных обо всех компонентах мехатронного комплекса;
- формирование журнала жизненного цикла мехатронного комплекса;
- проверку целостности данных;
- анализ данных в реальном времени с применением интеллектуальных алгоритмов обработки данных, в т.ч.:
 - оценивание эффективности работы машиниста, подачи транспорта и организации горных работ;
 - оценивание состояния и ресурса компонентов мехатронного комплекса экскаватора;
 - оценивание состояния внешней среды (питающей линии, температуры окружающей среды, качества электроэнергии, состояния забоя и др.)
- визуализацию данных, как на локальной панели оператора, так и на внешнем устройстве (например, ЭВМ) посредством Internet-соединения;
- информационное взаимодействие мехатронного комплекса экскаватора с машинами и персоналом горного предприятия и проектной организации.

Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения системы приведена на рисунке 3.1.

Регистрация данных осуществляется непосредственно с локальных ИДМ экскаватора, связь между ними и компьютером уровня АСУ ТП предлагается осуществлять по протоколу CAN или RS-485.



Рисунок 3.1 – Блок-схема, поясняющая работу программно-аппаратного комплекса системы «Электронный машинист»

Хранение данных может осуществляться как в памяти ЭВМ, так и на специальном сервере, а в простейшем случае запись и хранение данных может осуществляться с помощью самописца на flash-карту. В последнем случае для доступа к данным требуется извлечь карту памяти из самописца и переписать ее содержимое на другой носитель информации. Использование сервера базы

данных является наиболее сложным вариантом, однако позволяет организовать надежное хранение данных и, что самое главное, упрощает удаленный доступ к этим данным.

Проверка целостности данных осуществляется в автоматическом режиме на сетевом уровне взаимодействия АСУ ТП и локальных подсистем, однако, в зависимости от конкретного оборудования, возможность проверки данных может быть реализована и на прикладном уровне.

Система «Электронный машинист» включает в себя три подсистемы обработки данных, выполняющих следующие функции:

- оценку эффективности работы мехатронного комплекса карьерного экскаватора;
- оценку состояния оборудования мехатронного комплекса экскаватора;
- оценку ресурса компонентов мехатронного комплекса экскаватора.

3.2. Аппаратная платформа системы

Программно-аппаратный комплекс системы «Электронный машинист» в качестве своей аппаратной платформы использует концепцию информационной системы с распределенными вычислениями. Основными структурными элементами такой системы являются: компьютеры и серверы уровня АСУ ТП, ряд локальных информационной-диагностических модулей, каждый из которых реализует собственные аналитические, контрольные и диагностические функции, а также сетевое оборудование, позволяющее образовать ЕИП и обеспечить доступ мехатронного комплекса экскаватора к сети Internet, тем самым позволяя реализовать функции удаленного мониторинга (система «Виртуальный экскаватор»).

На рисунке 3.2 приведена структурная схема аппаратного комплекса системы «Электронный машинист».

В качестве центрального компьютера для экскаватора нового поколения требуется промышленная ЭВМ, обладающая высокой производительностью

(процессор уровня Intel Core i5, 4Гб ОЗУ, 128Гб SSD) и всеми необходимыми интерфейсами для связи с локальными ИДМ экскаватора, в частности, Ethernet, CAN или RS-485.

В интерфейсной части локальных ИДМ предлагается использовать интерфейс с гарантированным временем доставки пакетов, для этих целей подходят CAN или RS-485.

В системе «Электронный машинист» предлагается использовать локальные ИДМ разных типов, это связано с тем, что они устанавливаются на принципиально разное оборудование.

В локальных ИДМ мехатронного комплекса используются следующие датчики:

- датчики тока и напряжения;
- датчики скорости (например, энкодеры [84]);
- датчики длины щеток (концевые выключатели) для ДПТ;
- датчики параметра, характеризующего искрение (радио-детекторы, датчики озона, датчики света) для ДПТ;
- датчики температуры (воздуха, смазки, подшипников, радиаторов охлаждения, обмоток двигателей и трансформаторов и др.);
- инклинометры (датчики положения экскаватора);
- датчики давления в пневмосистеме;
- датчики давления масла;
- датчики включения оборудования;

Выходные сигналы датчиков локальных ИДМ подвергаются аналого-цифровому преобразованию и затем поступают на локальное вычислительное устройство, представляющее собой микроконтроллерный модуль, оснащенный цифровыми интерфейсами ввода (в частности, I2C, SPI, UART и GPIO) и цифровыми интерфейсами вывода (CAN или RS-485). Микроконтроллер осуществляет обработку данных по заданным алгоритмам, а также сетевое взаимодействие с вычислительными устройствами уровня АСУ ТП.

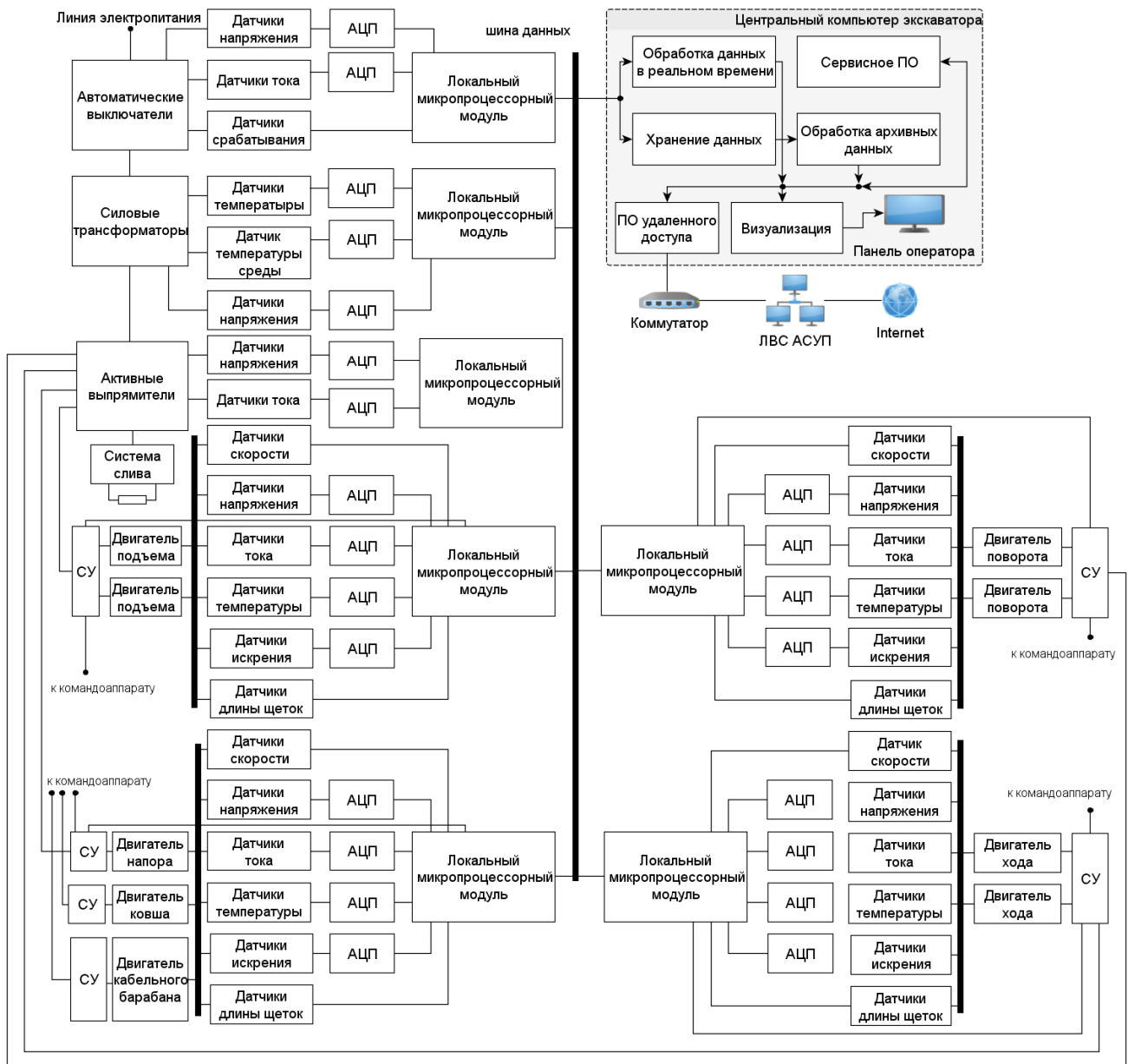


Рисунок 3.2 – Общая структурная схема аппаратного комплекса системы

«Электронный машинист»

Связь с АСУП может осуществляться различными способами, в настоящей работе для этой цели предлагается использовать протокол Gigabit Ethernet, обладающий высокой пропускной способностью (в отличие от CAN и RS-485) при сравнительно низкой стоимости оборудования (в отличие, например, от Infiniband) [85, 86].

Для связи с глобальной сетью предлагается использовать один из двух подходов. Если физически невозможно объединить все экскаваторы карьера в ЕИП напрямую (по Ethernet или WiFi), необходимо оснастить каждый из экскаваторов собственным GSM-модемом, таким образом получив децентрализованный доступ к сети Internet. Если объединить все экскаваторы карьера в локальную сеть возможно – тогда наиболее целесообразным подходом будет организация централизованного доступа к Internet посредством спутникового соединения. Данное соединение является более надежным и обеспечивает большую скорость обмена данными.

В случае применения GSM-оборудования, необходимо наличие вблизи экскаватора GSM-ретранслятора, а учитывая удаленность многих карьеров от населенных пунктов и расположение карьерной техники на значительной глубине относительно рельефа местности, приходится использовать специальные антенны и усилители. Это снижает надежность телекоммуникационной системы и увеличивает ее стоимость, поэтому наиболее перспективным подходом к организации Internet-соединения в карьере является система спутниковой связи.

3.3. Оценка эффективности работы мехатронного комплекса карьерного экскаватора

В качестве общего показателя работы экскаватора, как правило, используется объем отгруженной породы $V_{общ}$ за определенный период времени (например, за смену). Если принять, что $V_{макс}$ - это максимальный объем породы, который экскаватор может погрузить в течение заданного периода времени, то эффективность работы экскаватора в карьере определяется по формуле (3.1):

$$V_{общ} = V_{макс} \cdot k_{пр}(n_{общ}) \cdot \frac{n_{общ}}{n_{макс}} \cdot k_{маш}, \quad (3.1)$$

где: $k_{пр}(n_{общ})$ - коэффициент, характеризующий время простоя экскаватора, связанного с работами по ремонту и обслуживанию, $n_{общ}$ - количество

загруженных самосвалов, $n_{\max}$ - максимально возможное количество загруженных самосвалов, $k_{\text{маш}}$ - коэффициент, характеризующий скорость заполнения породой кузова самосвала.

Учитывая, что обычно $\frac{n_{\text{общ}}}{n_{\max}} \ll k_{\text{маш}}$, можно сделать вывод о том, что на объем отгруженной породы за определенный период времени (например, за смену) в наибольшей степени влияет лишь время простоя между подачами самосвала.

Система «Электронный машинист» позволяет, помимо объема отгруженной породы, дополнительно рассчитывать показатели, позволяющие оценить эффективность работы экскаватора:

- общее время работы экскаватора $t_{\text{общ}}$;
- общее время погрузки $t_{\text{погр}}$;
- общее энергопотребление $W_{\text{общ}}$;
- энергопотребление при погрузке $W_{\text{погр}}$;
- среднюю мощность при простое $P_{\text{хх}}$;
- среднюю мощность при погрузке $P_{\text{погр}}$;
- общее количество загруженных самосвалов $n_{\text{сам}}$;
- общее количество загруженных ковшей $n_{\text{ковш}}$;
- энергию, затрачиваемую на загрузку одного самосвала $W_{\text{сам}}$;
- энергию, затрачиваемую на загрузку одного ковша $W_{\text{ковш}}$;
- среднее время загрузки одного самосвала $t_{\text{сам}}$;
- среднее время загрузки одного ковша $t_{\text{ковш}}$;
- удельную энергоемкость экскавации $p_{\text{э}}$;

Сопоставление показателей $t_{\text{общ}}$ и $t_{\text{погр}}$ позволяет определить процент времени погрузки:

$$n_{\text{погр}} = \frac{t_{\text{общ}}}{t_{\text{погр}}} \cdot 100\%$$

и процент времени простоя:

$$n_{\text{прос}} = \left(1 - \frac{t_{\text{общ}}}{t_{\text{погр}}} \right) \cdot 100\%.$$

Сопоставление процента времени погрузки и простоя, с показателями $W_{\text{общ}}$, $W_{\text{погр}}$, $P_{\text{хх}}$ и $P_{\text{погр}}$ позволяет оценить энергетическую эффективность работы экскаватора в карьере.

Показатели $n_{\text{сам}}$, $n_{\text{ковш}}$, $W_{\text{сам}}$ и $t_{\text{сам}}$ позволяют оценить эффективность работы машиниста.

Рассмотрим простой пример: при удельной массе породы $\rho = 2,4 \text{ кг/м}^3$, экскаватору ЭКГ-18Р, имеющему ковш объемом $V_{\text{экс}} = 20 \text{ м}^3$, для загрузки одного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью $m_{\text{сам}} = 120$ тонн требуется $n = 3$ ковша породы, однако при коэффициенте заполнения ковша $k_{\text{зан}} < 0,8$, требуется загрузить уже четыре ковша, т.к. при $n = 3$, $m_{\text{экс}} = V_{\text{экс}} \cdot \rho \cdot k_{\text{зан}} \cdot n = 115,2$ тонн. Из этого следует, что если машинист будет зачерпывать недостаточно породы, количество электроэнергии, которое требуется для загрузки одного самосвала, может увеличиться на 25%.

При оценке эффективности отдельных компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, предлагается использовать показатели $W_{\text{ковш}}$, $t_{\text{ковш}}$ и $\rho_{\text{э}}$. Контроль показателя $W_{\text{ковш}}$ особенно важен, т.к. при неверной настройке СУ электроприводами главного движения, энергопотребление этих компонентов мехатронного комплекса может вдвое превысить номинальное [87].

При оценке эффективности работы экскаватора требуется определять массу грунта, загружаемого экскаватором в кузов автосамосвала.

Взвешивание грунта может проводиться непосредственно на экскаваторе с применением различных косвенных методов, основанных на измерении токов и

напряжений приводов главного движения и положений рабочего органа экскаватора в течение рабочего цикла.

Примером способа косвенного определения веса ковша является способ определения веса ковша экскаватора-драглайна [88]. Вес ковша определяется, как разность усилий в подъемном и тяговом канатах:

$$m = \frac{F_{\Pi} - F_T}{\mu},$$

где m – вес ковша, F_{Π} – усилие в подъемном канате, F_T – усилие в тяговом канате, μ – коэффициент пропорциональности, определяемый из выражения:

$$\mu = \frac{\cos(\varepsilon - \varphi_T) - \cos(\varepsilon + \varphi_{\Pi})}{\sin(\varphi_{\Pi} + \varphi_T)},$$

где ε – угол наклона стрелы экскаватора к горизонту, φ_{Π} – угол между подъемным канатом и стрелой экскаватора, φ_T – угол между тяговым канатом и стрелой экскаватора.

Определение усилий подъемного и тягового канатов при реализации данного способа может быть выполнено на основании токов и напряжений приводов подъема и тяги.

В настоящее время, несмотря на очевидные достоинства, косвенные методы определения массы ковша имеют серьезный недостаток – они не позволяют достичь высокой точности измерения массы.

Другим методом измерения массы грунта является взвешивание породы непосредственно в кузове автосамосвала. Для этого разработаны специализированные программно-аппаратные системы, одной из которых является система Dumper Scale [89] компании Dinamica Generale.

На рисунке 3.3 проиллюстрирована компоновка измерительного оборудования системы Dumper Scale на автосамосвале.

К основным характеристикам и преимуществам системы относятся: погрешность измерений до $\pm 1\%$, возможность подключения принтера и WiFi

модуля, питание системы от сети 12...24 В, отдельный выход для подключения систем слежения за транспортом, высокая надежность [89].

С целью решения данной задачи автором предлагается новый способ контроля массы при погрузке экскаватором грунта в автосамосвал [90].

Структурная схема системы контроля массы при погрузке экскаватором грунта в автосамосвал представлена на рисунке 3.4.

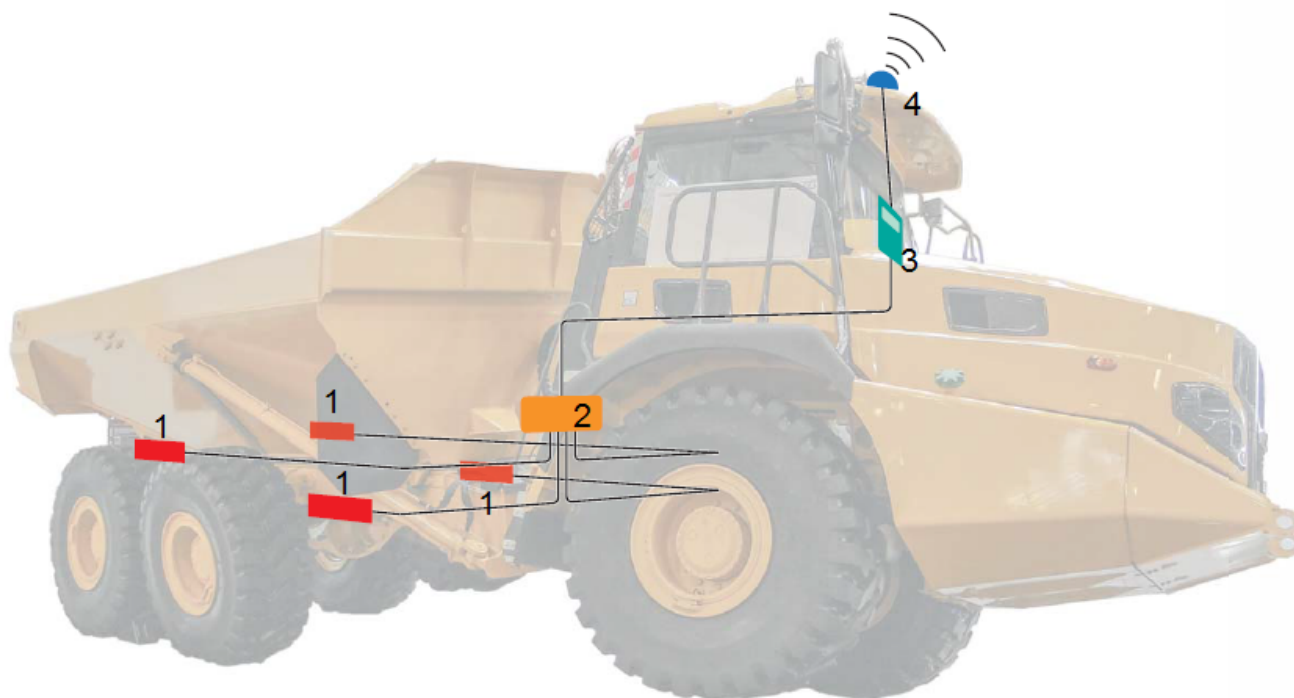


Рисунок 3.3 – Компоновка измерительного оборудования системы Dumper Scale на автосамосвале, 1 – тензодатчики, 2 – центральное вычислительное устройство, 3 – приемопередатчик, 4 – антенна беспроводной связи

При работе экскаватора 1 его бортовой приемник 4 обнаруживает автосамосвалы, находящиеся в зоне действия беспроводной сети. При этом на мониторе 2 в кабине машиниста отображаются данные со всех обнаруженных автосамосвалов:

- идентификационный номер автосамосвала;
- максимальная загрузка автосамосвала (определяется по идентификационному номеру автосамосвала согласно таблице данных, хранящейся в памяти бортового компьютера экскаватора);

- время прибытия самосвала (время, когда автосамосвал появился в зоне действия беспроводной сети экскаватора);
- номер рейса;
- масса грунта в кузове автосамосвала;
- количество загруженных ковшей.

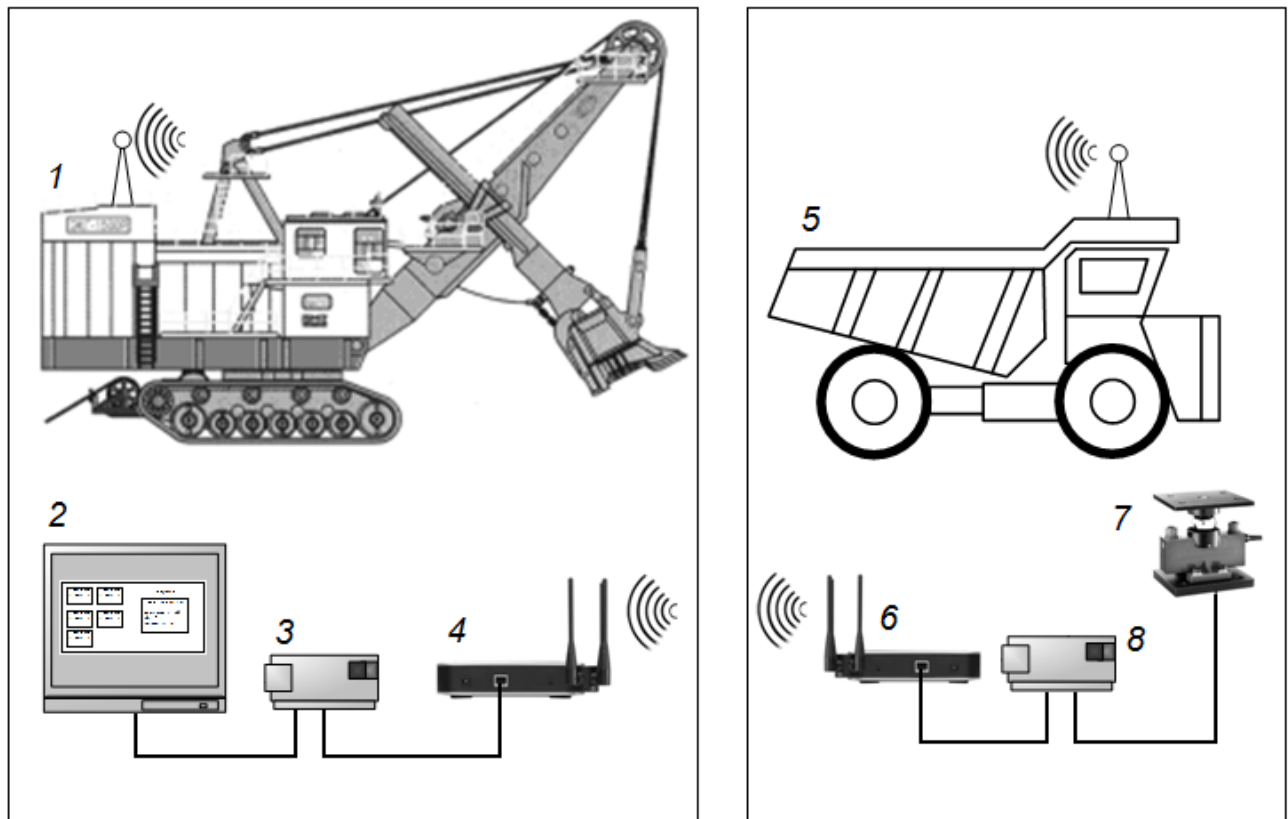


Рисунок 3.4 – Функциональная схема системы контроля массы при погрузке экскаватором грунта в автосамосвал, где 1 – экскаватор; 2 – монитор в кабине машиниста экскаватора; 3 – бортовой компьютер экскаватора; 4 – беспроводной приемник экскаватора; 5 – самосвал; 6 – беспроводной передатчик самосвала; 7 – система взвешивания грунта в кузове самосвала; 8 – бортовой компьютер самосвала

Масса грунта в кузове автосамосвала взвешивается с помощью бортовой системы взвешивания 7. Для автосамосвалов, масса грунта в кузове которых близка к нулю, отображение данных производится в малом масштабе (рисунок 3.5). Автосамосвал 5, находящийся в зоне загрузки, находится в поле зрения машиниста, который осуществляет экскавацию грунта и высыпание его в кузов автосамосвала 5. При выгрузке ковша масса в кузове автосамосвала 5

увеличивается. Эта информация поступает в бортовой компьютер 3 экскаватора 1. При этом происходит автоматическое увеличение масштаба изображения данных о загрузке этого самосвала (рисунок 3.5). Машинисту при этом предоставляется информация о массе выгруженного грунта, общей массе грунта в кузове автосамосвала 5 и о количестве выгруженных ковшей.

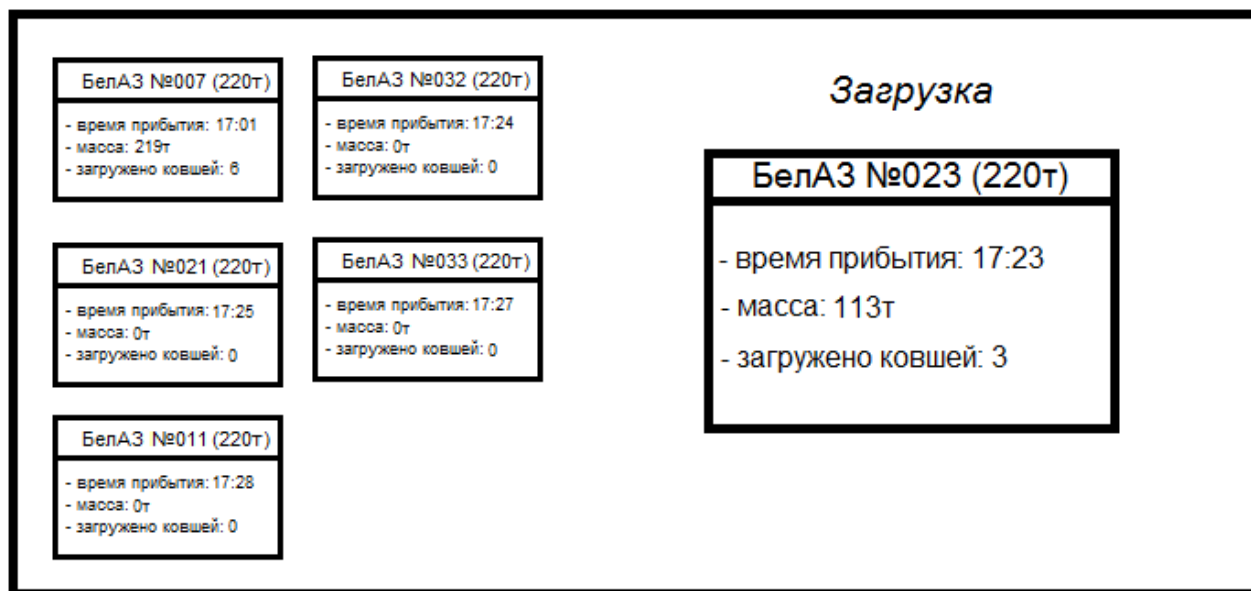


Рисунок 3.5 – Мнемосхемы отображения данных на мониторе машиниста

После завершения загрузки автосамосвал 5 убывает, в зону загрузки прибывает другая машина. Далее процесс повторяется.

Если в непосредственной близости (в зоне действия беспроводной сети) от экскаватора находится лишь один самосвал, то на панели оператора машиниста отображается информация только об этом автосамосвале.

Особенностью работы системы является возможность одновременного получения данных сразу с нескольких автосамосвалов. Для этого может быть использована, например, сеть передачи данных Wi-Fi 802.11n. При этом на экскаваторе устанавливается беспроводной маршрутизатор, к которому могут быть подключены беспроводные клиенты.

3.4. Оценка состояния компонентов мехатронного комплекса

Оценка состояния оборудования осуществляется на основе анализа переменных, поступающих из ИДМ, с помощью нейронно-логического анализатора. Анализатор определяет принадлежность режима работы компонентов мехатронного комплекса к области нормальных, допустимых или аварийных режимов. При изменении режима работы одного из компонентов мехатронного комплекса осуществляется протоколирование данного события. Блок-схема, поясняющая алгоритм работы системы, показана на рисунке 3.6.

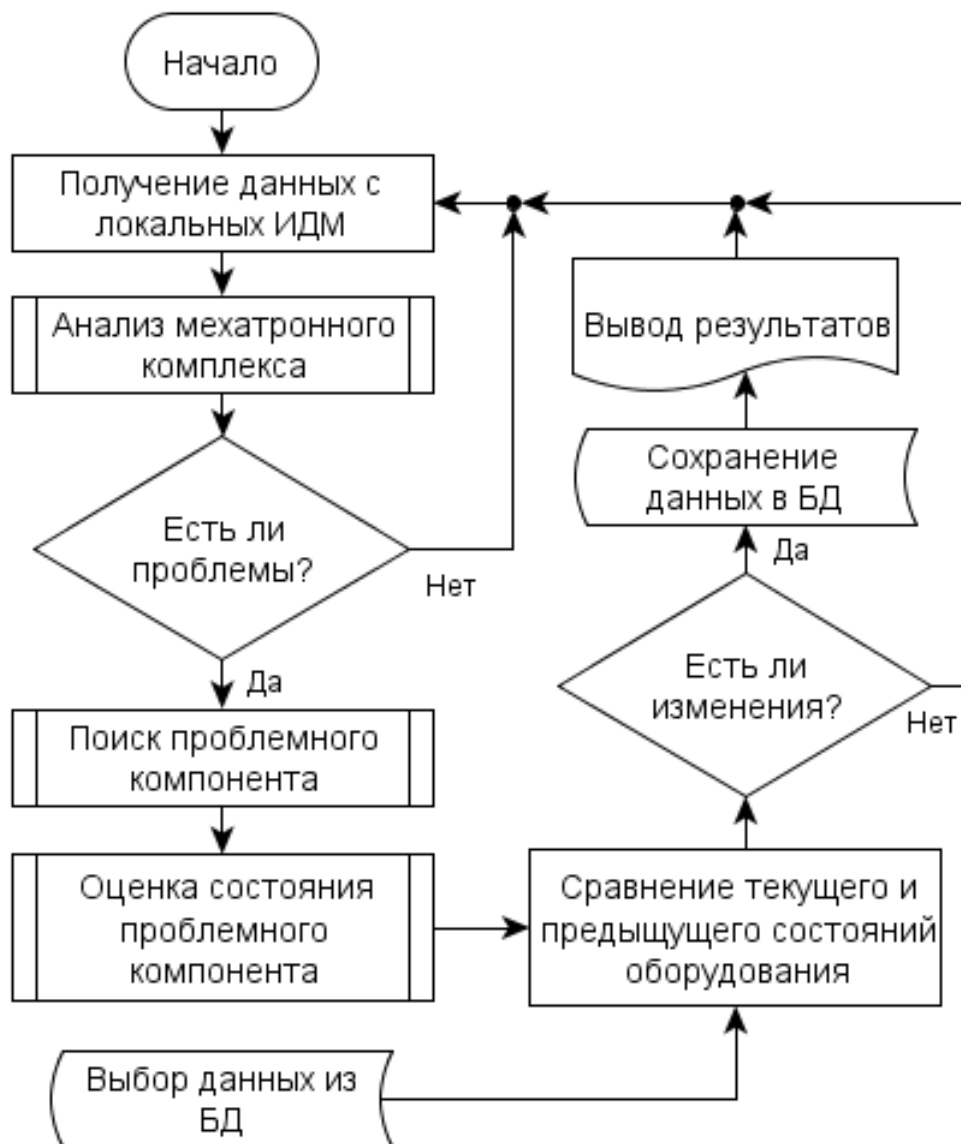


Рисунок 3.6 – Блок- схема алгоритма оценки состояния оборудования

В работе реализована оценка состояния следующих компонентов мехатронного комплекса экскаватора:

- ЩКУ электродвигателей постоянного тока приводов главного движения;
- обмоток ротора и статора АД приводов главного движения;
- обмоток силовых трансформаторов (ТГД и ТСН);
- автоматических выключателей.

Нейронный анализатор построен по топологии самообучающейся сети Кохонена (при наличии достоверных данных о режиме работы компонентов мехатронного комплекса экскаватора возможно использование нейронных сетей топологии персептрон), осуществляющей кластеризацию входных данных.

Существует два способа кластеризации данных, первый предполагает оценку состояния мехатронного комплекса в целом, при этом используется 3 нейрона выходного слоя, соответствующих нормальному, допустимому и аварийному режимам работы. Второй способ предполагает более глубокий анализ данных, при котором сначала определяется проблемный компонент мехатронного комплекса, а далее выполняется определение его состояния, при этом количество нейронов, задействованных в процессе анализа, определяется общим количеством возможных состояний оборудования.

Каждый компонент мехатронного комплекса предполагает собственный набор переменных состояния, характеризующих его работу. В таблице 3.1 приведено сопоставление компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора и переменных состояния, характеризующих их работу.

Таблица 3.1 – Переменные состояния, характеризующие работу компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Переменные состояния	Оборудование			
	Двигатели постоянного тока	Асинхронные двигатели	Силовые трансформаторы	Автоматические выключатели
Действующие значения U и I	+	+	+	+
Действующие значения мощности P , Q и S	+	+	+	+
Коэффициенты корреляции $r_{\xi i}$ и $r_{\xi \Omega}$	+	-	-	-
Сопротивление и ЭДС ЭЛ	-	-	+	-
Температура обмоток	+	+	+	-
Температура подшипников	+	+	-	-
Температура окружающей среды	+	+	+	-
Влажность окружающей среды	+	+	+	+
Вибрация	+	+	-	-
Количество срабатываний защиты	-	-	-	+
Общий ресурс компонента	+	+	+	+
Общее время работы компонента	+	+	+	+

3.5. Оценка ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Оценка ресурса компонентов мехатронного комплекса экскаватора осуществляется на уровне локальных ИДМ, при этом система «Электронный машинист» осуществляет контроль состояния всех узлов машины, оборудованных локальными ИДМ, с возможностью оценки ресурса.

Блок-схема алгоритма проиллюстрирована на рисунке 3.7. Данный алгоритм справедлив для карьерных экскаваторов, которые в качестве приводов главного движения используют ДПТ. В случае АД, вместо ресурса щеток производится оценка ресурса обмоток статора.

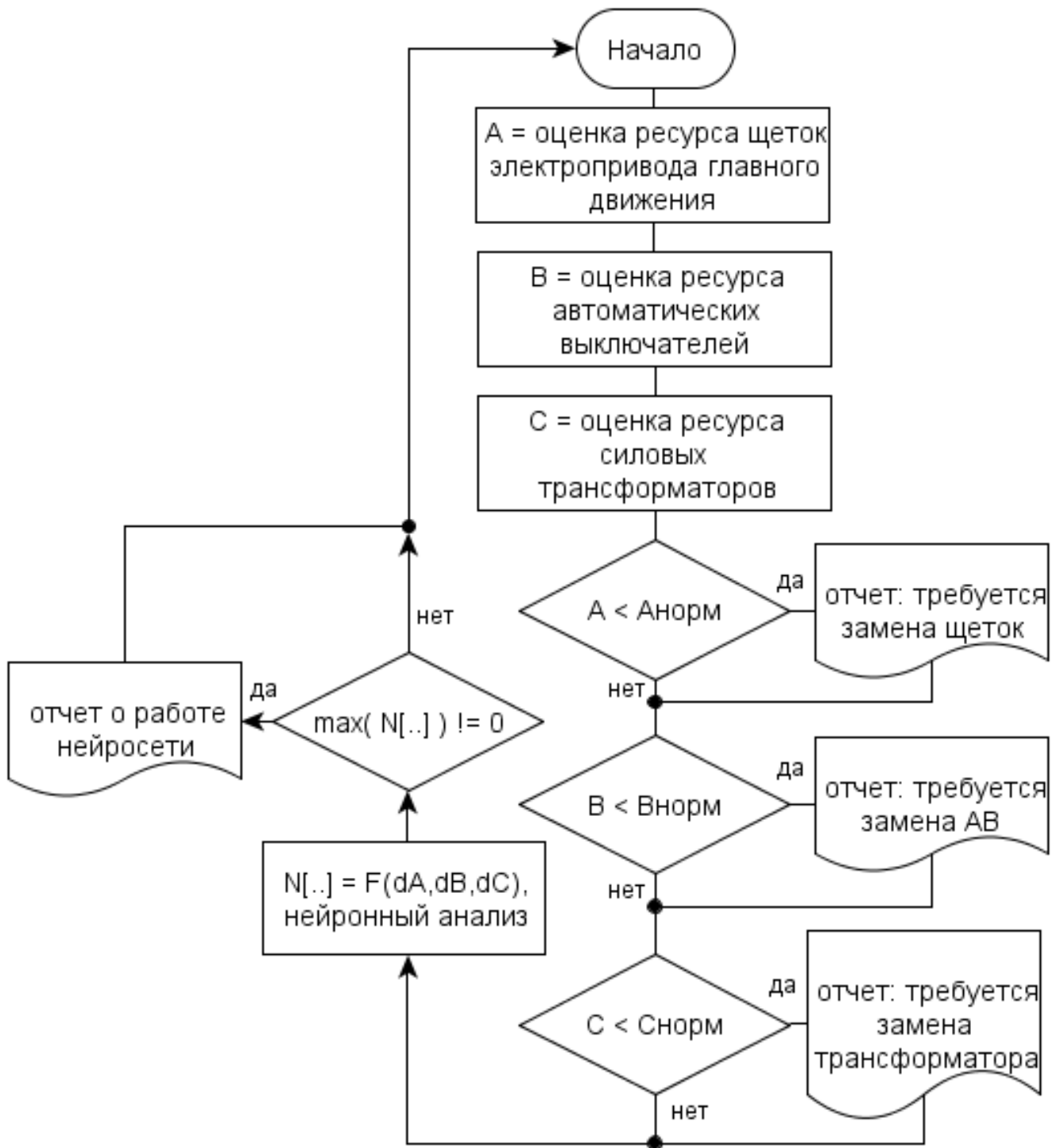


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритма анализа ресурса узлов мехатронного комплекса карьерного экскаватора

Данный алгоритм можно разделить на две ветви:

- ветвь контроля критического изнашивания, основной функцией которой является информирование оператора о необходимости проведения

ремонта или замены узла. Работа этой ветви осуществляется на основании принципа логических правил;

- ветвь предиктивной диагностики, отвечающая за анализ скорости изнашивания узлов машины. Если узел изнашивается слишком быстро, осуществляется информирование об этом оператора, а также производится поиск возможных неисправностей данного узла.

Работа системы предиктивной диагностики осуществляется с применением нейронных сетей [91] топологии рекуррентный персептрон, которые анализируют динамику изменения ресурса узлов мехатронного комплекса экскаватора, на основании чего производится анализ текущего режима работы машины.

3.6. Локальные информационно - диагностические модули мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора

В работе предложены информационно - диагностические модули для следующих компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора:

- системы электропитания;
- электрических машин постоянного тока приводов главного движения;
- силовых трансформаторов и асинхронных двигателей;
- автоматических выключателей.

Система электропитания

Эффективная работа горных машин в карьере обеспечивается при регламентированных параметрах электрической энергии. Электропитание электрических экскаваторов обычно осуществляется с помощью консольных передвижных линий, параметры которых изменяются в процессе перемещения фронта горных работ. Работа нескольких потребителей большой единичной мощности от одной подстанции, вызывает отклонения и колебания напряжения в питающей сети. Активное сопротивление сети находится в зависимости от температуры окружающей среды.

В этих условиях непрерывный контроль параметров питающей линии позволяет оперативно определять и устранять нарушения в системе электроснабжения и адаптировать мехатронный комплекс экскаватора к изменениям режима электропитания.

Известные способы идентификации параметров питающей сети основаны на использовании информации о токах и напряжениях на приемном и передающем концах линии [92, 93, 94]. В условиях карьера передача данных о напряжении на подстанции требует использования специальных технических средств, при этом не обеспечивается высокая надежность.

Разработан новый способ идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор [95], особенностью которого является то, что процедура измерения и идентификации проводится с помощью локального ИДМ, находящегося непосредственно на экскаваторе.

Предлагаемый способ идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор, основан на анализе токов и напряжений на вводе экскаватора в различных режимах его работы. Особенностью работы экскаватора, как электроприемника, является чередование в цикле экскавации (~30 с) режимов потребления и рекуперации электроэнергии (рисунок 3.8). Рекуперация происходит при торможении поворотной платформы, опускании ковша, движении привода напора под действием горной породы. При изменении режима работы ток нагрузки практически равен нулю. Следовательно, напряжение на вводе экскаватора равно напряжению в центре питания. Анализ токов и напряжений при двух других режимах – потреблении электроэнергии и ее рекуперации, позволяет определить активное и реактивное сопротивления линии электропередачи.

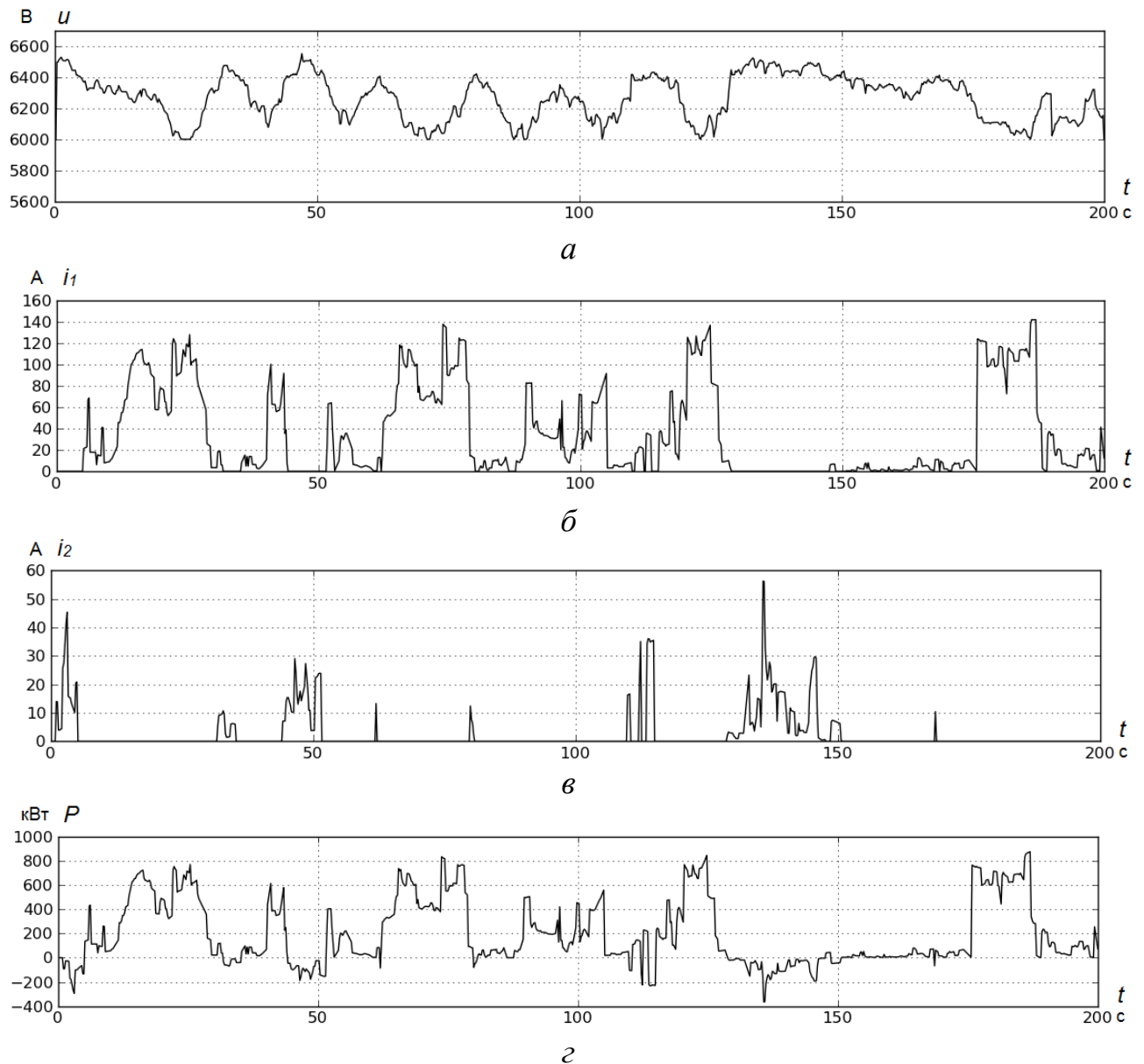


Рисунок 3.8 – Временные диаграммы (а) – напряжения, (б) – тока потребления, (в) – тока рекуперации и (г) – активной мощности в узле нагрузки экскаватора

Функциональная схема системы идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор, представлена на рисунке 3.9.

Система, реализующая предлагаемый способ, работает следующим образом. Сигналы с датчиков тока 7 и напряжения 8 поступают на входы контроллера 9.

Контроллер 9 выполняет следующие функции:

- аналого-цифровое преобразование сигналов тока и напряжения, поступающих с выходов датчиков соответственно 7 и 8;
- непрерывное измерение угла сдвига фаз между током и напряжением;

- непрерывное вычисление действующих значений тока и напряжения за период питающей сети;
- запоминание массивов действующих значений напряжения и тока и углов сдвига фаз между током и напряжением в течение цикла экскавации;
- определение максимального значения тока I_1 в режиме потребления электрической энергии и соответствующих ему значений напряжения U_1 и угла φ_1 сдвига фаз, запоминание I_1 , U_1 и φ_1 ;
- определение максимального значения тока I_2 в режиме потребления электрической энергии и соответствующих ему значений напряжения U_2 и угла φ_2 сдвига фаз, запоминание значений I_2 , U_2 и φ_2 ;
- определение значения напряжения U_0 , соответствующего действующему значению тока $I_0 \approx 0$, запоминание значения U_0 ;
- вычисление значений активного r и реактивного x сопротивлений линии электропередачи путем численного решения системы уравнений (3.2)

$$\begin{cases} U_0^2 = (U_1 + rI_1 \cos \varphi_1 - xI_1 \sin \varphi_1)^2 + (rI_1 \sin \varphi_1 + xI_1 \cos \varphi_1)^2; \\ U_0^2 = (U_2 - rI_2 \cos \varphi_2 + xI_2 \sin \varphi_2)^2 + (rI_2 \sin \varphi_2 + xI_2 \cos \varphi_2)^2. \end{cases} \quad (3.2)$$

Данные о значениях активного r и реактивного x сопротивления, а также расчетного значения напряжения на передающем конце линии электропередачи $E=U_0$, по шине данных 12 передаются в промышленный компьютер 10 для регистрации, хранения и отображения с помощью монитора 11.

Расчетное значение напряжения на передающем конце линии электропередачи, активное и реактивное сопротивление электропитающей линии (ЭЛ) являются важными показателями, свидетельствующими о состоянии линии, однако их оценка может быть использована не только для контроля и диагностики ЭЛ, но и для управления экскаватором. При значительном отклонении параметров линии от нормы, классический экскаватор не способен продолжать работу, однако если провести корректировку настроек системы управления приводами главного движения, работа экскаватора в ряде случаев (если параметры линии не перешли

в диапазон аварийных значений) может быть продолжена, но с меньшей нагрузкой.

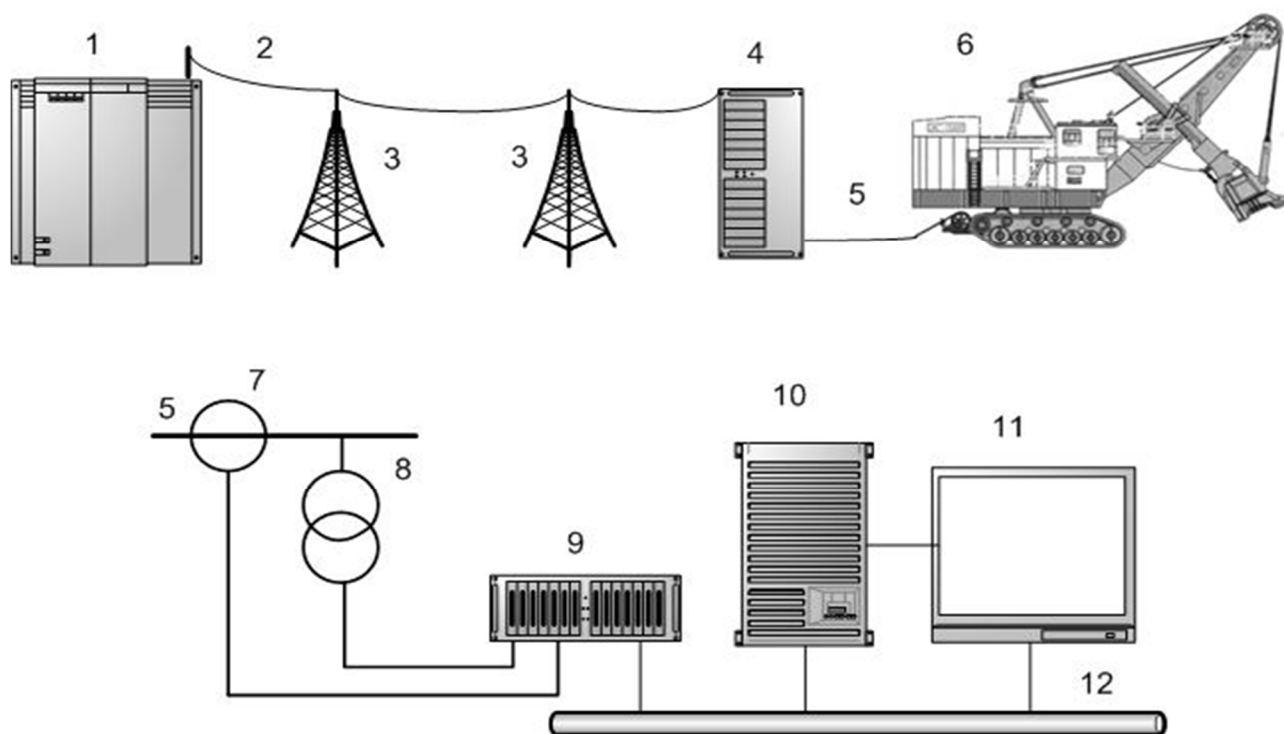


Рисунок 3.9 – Функциональная схема системы идентификации параметров ЭЛ, питающей экскаватор: 1 – трансформаторная подстанция; 2 – воздушная линия электропередачи; 3 – опоры линии электропередачи; 4 – переключательный пункт; 5 – кабель; 6 – экскаватор; 7 – трансформатор тока; 8 – трансформатор напряжения; 9 – контроллер; 10 – промышленный компьютер (сервер); 11 – монитор; 12 – шина

Решение системы (3.2) наиболее просто осуществляется численным способом, например, методом простых итераций. В качестве начальных значений при решении выбираются расчетные параметры линии. При малой заданной погрешности решение находится всего за несколько итераций. Листинг программы, предназначенной для решения системы уравнений (3.2) приведен в приложении 3.

Использование разработанной методики, алгоритма и программного обеспечения на экскаваторах обеспечивает постоянный контроль состояния подсистемы энергоснабжения и адаптацию системы управления экскаватора к изменяющимся условиям электропитания.

Электрические машины постоянного тока

Электроприводы главного движения большинства современных карьерных экскаваторов используют электрические машины постоянного тока [96].

Наименее надежным узлом ДПТ является щеточно-коллекторный узел. В рамках настоящей работы разработан новый способ контроля работы данного узла [97, 98].

На рисунке 3.10 показана функциональная схема системы контроля и визуализации работы щеточно-коллекторного узла.

Работа системы происходит следующим образом. Сигналы с датчиков угловой скорости ротора 2, длины щеток 6, параметра, характеризующего искрение 7, температуры обмоток ротора 8 и тока якорной обмотки 9 коллекторной электрической машины 3, соединенной с электрической сетью посредством преобразователя 10, поступают на многоканальный аналого-цифровой преобразователь 1, а далее по шине данных 11 в вычислительное устройство, например, компьютер. Вычислительное устройство выполняет следующие функции:

- хранит в памяти модель механической характеристики двигателя;
- синтезирует изображение рабочей точки двигателя в плоскости параметров ток-скорость на фоне механической характеристики;
- вычисляет коэффициенты корреляции $r_{\xi i}$ и $r_{\xi \Omega}$ на скользящем интервале времени в соответствии с формулами:

$$r_{\xi i} = \frac{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}] \cdot [i(k) - \bar{i}]}{\sqrt{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}]^2 \cdot \sum_{k=n-N+1}^n [i(k) - \bar{i}]^2}}; \quad r_{\xi \Omega} = \frac{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}] \cdot [\Omega(k) - \bar{\Omega}]}{\sqrt{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}]^2 \cdot \sum_{k=n-N+1}^n [\Omega(k) - \bar{\Omega}]^2}},$$

где $\bar{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n \xi(k)$, $\bar{i} = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n i(k)$, $\bar{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n \Omega(k)$, $n \geq N$, n – базисная точка

на оси времени, N – количество отсчетов на скользящем интервале времени;

- производится оценка искрения щеточно-коллекторного узла, по следующей схеме: если $r_{\xi i} \approx 0$ и $r_{\xi \Omega} \approx 0$, то искрение отсутствует, если $r_{\xi i} \gg r_{\xi \Omega}$, то причины искрения электромагнитные (искрение зависит от механической нагрузки, или для ДПТ – тока [97]), если $r_{\xi i} \ll r_{\xi \Omega}$, то причины искрения механические (искрение зависит от скорости [97]), если $r_{\xi i} \approx r_{\xi \Omega}$ и $r_{\xi i} \gg 0$, то причины искрения – смешанные.

- в зависимости от значений температуры обмоток, угловой скорости ротора, тока, длины щеток, параметра, характеризующего искрение, коэффициентов корреляции $r_{\xi i}$ и $r_{\xi \Omega}$, определяют принадлежность режима работы двигателя к области нормальных, допустимых или аварийных режимов и определяют причину искрения;

- регистрируют значения длины щеток и оценок коэффициентов корреляции $r_{\xi i}$ и $r_{\xi \Omega}$ в памяти вычислительного устройства;

- определяют принадлежность режима работы двигателя к области нормальных, допустимых или аварийных режимов с помощью неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 < i < I_2; \\ \Omega_1 < \Omega < \Omega_2; \\ \theta_1 < \theta < \theta_2; \\ \xi_1 < \xi < \xi_2; \\ r_{\xi \Omega_1} < r_{\xi \Omega} < r_{\xi \Omega_2}; \\ r_{\xi i_1} < r_{\xi i} < r_{\xi i_2}; \\ l_1 < l < l_2. \end{array} \right.$$

В неравенства входят такие параметры, как ток якорной обмотки i , угловая скорость Ω , температура обмоток ротора θ , длина щеток l , параметр, характеризующий искрение ξ и коэффициенты корреляции $r_{\xi \Omega}$ и $r_{\xi i}$. Каждому из режимов (нормальному, допустимому и аварийному) соответствуют свои допустимые интервалы для каждого из параметров.

В случае, если все параметры находятся в нормальных интервалах значений, режим работы двигателя считается нормальным. Если хотя бы один из параметров выходит из интервала, соответствующего нормальному режиму, и при этом ни один из параметров не выходит за границы интервала, соответствующего допустимому режиму, режим работы двигателя считается допустимым. Если хотя бы один из параметров выходит из интервала, соответствующего допустимому режиму работы, то в этом случае двигатель работает в аварийном режиме.

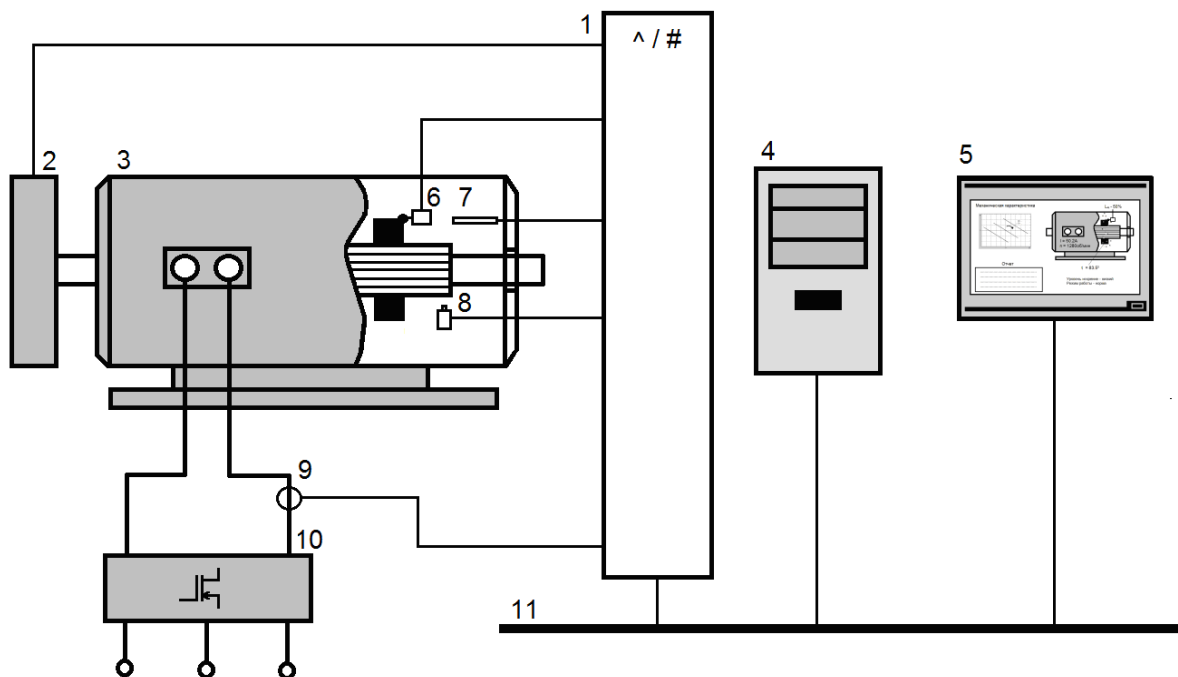


Рисунок 3.10 – Структура системы контроля искрения щеточно-коллекторного узла электрического двигателя постоянного тока 1 – контроллер, 2 – датчик угловой скорости ротора, 3 – электрический двигатель постоянного тока, 4 – компьютер (уровня АСУ ТП), 5 – панель оператора, 6 – датчик длины щеток, 7 – датчик параметра, характеризующего искрение, 8 – датчик температуры обмоток ротора, 9 – датчик тока якорной обмотки, 10 – преобразователь напряжения, 11 – шина данных (в простейшем случае)

Известно, что искрение щеток может быть вызвано множеством причин, к основным из которых относятся механические (механическое искрение) и электромагнитные (электромагнитное искрение) [99]. Имеются и другие причины искрения, в частности физико-химические и потенциальные (при повышенном

напряжении между ламелями), однако их непрерывный контроль с применением ИДМ в настоящее время не производится, т.к. для этого необходимо оснастить электроприводы дополнительным измерительным оборудованием, что для экскаваторов текущего поколения не представляется возможным.

Механические причины, вызывающие искрение, не зависят от нагрузки. При механическом искрении искры зеленого цвета распространяются по всей ширине щетки, подгар коллектора не закономерный, беспорядочный. Механическое искрение щеток вызывается: местным или общим биением, задирами на скользящей поверхности коллектора, царапинами, выступающей слюдой, плохой продорожкой коллектора (прорезка слюды между коллекторными пластинами), тугой или слабой посадкой щеток в обоймы щеткодержателей, податливостью бракет, вызывающей вибрацию щеток, вибрацией машин и др [97].

Электромагнитные причины, вызывающие искрение щеток, более сложные, что касается их выявления. Искрение, вызванное электромагнитными явлениями, изменяется пропорционально нагрузке и мало зависит от частоты вращения. Электромагнитное искрение обычно имеет бело-голубой цвет. Форма искр шаровидная или каплеобразная. Подгар коллекторных пластин носит закономерный характер, по которому можно определить причину искрения. Если в обмотке и уравнивателях произойдет замыкание, нарушится пайка или возникнет прямой обрыв, искрение будет неравномерным под щетками, а подгоревшие пластины расположатся по коллектору на расстоянии одного полюсного деления. Если щетки под бракетом одного полюса искрят больше, чем под бракетами других полюсов, значит, произошло витковое или короткое замыкание в обмотках отдельных главных или добавочных полюсов; неправильно расположены щетки или ширина их больше допустимой [97].

В качестве параметра, характеризующего искрение, возможно использование интенсивности электромагнитного излучения, наводимого на приемную антенну датчика искрения. Установлено, что спектр сигнала, регистрируемый датчиком интенсивности искрения на коллекторе электрической

машины постоянного тока, есть функция, определяющая величину амплитуды составляющей в зависимости от её частоты и количества выделяющейся электромагнитной энергии. [100].

Искрение щеток измеряется в баллах. Нормальным при работе машины постоянного тока считается слабое точечное искрение под небольшой частью щетки (1/4 балла). Искрение под всем краем щетки (2 балла) допускается только при переходных режимах и кратковременных перегрузках. Сильное искрение (3 балла) ни при каких условиях не допускается. При возникновении такого искрения машина должна быть немедленно отключена от сети и подвергнута осмотру и при необходимости – ремонту [101].

При решении задачи диагностики щеточно-коллекторного узла электрической машины, помимо контроля искрения, важной проблемой является контроль износа щеток. С этой целью, автором работы был разработан новый способ контроля износа щеточно-коллекторного узла электрической машины [98, 102, 103].

На рисунке 3.11 показан пример схемы контроля износа щеток и работы щеточно-коллекторного узла электрической машины (двигателя) при реализации предлагаемого способа.

Работа схемы контроля износа щеток и работы щеточно-коллекторного узла электрической машины происходит следующим образом. Сигналы с датчиков угловой скорости ротора 1, тока якорной обмотки 5, датчика предельного значения длины щеток 6 и логического выхода преобразователя 3 поступают на входы контроллера 7.

Контроллер 7 выполняет следующие функции:

- аналого-цифровое преобразование сигналов угловой скорости и тока, поступающих с выходов соответствующих датчиков 1 и 5;
- вычисление полного времени работы электрической машины в соответствии с сигналом, поступающим от преобразователя 3;
- вычисление остаточного ресурса щеток по формуле (3.3)

$$T(\tau) = T_0 - k_1 \int_0^{\tau} \Omega(t) dt - k_2 \int_0^{\tau} i^2(t) dt - k_3 \int_0^{\tau} e^{-\frac{i-i_0}{i_0}} dt; \quad (3.3)$$

где T_0 – номинальный ресурс щеток, k_1 , k_2 и k_3 – весовые коэффициенты, равные расчетным коэффициентам ресурсного изнашивания щеток, i_0 – ток холостого хода машины.

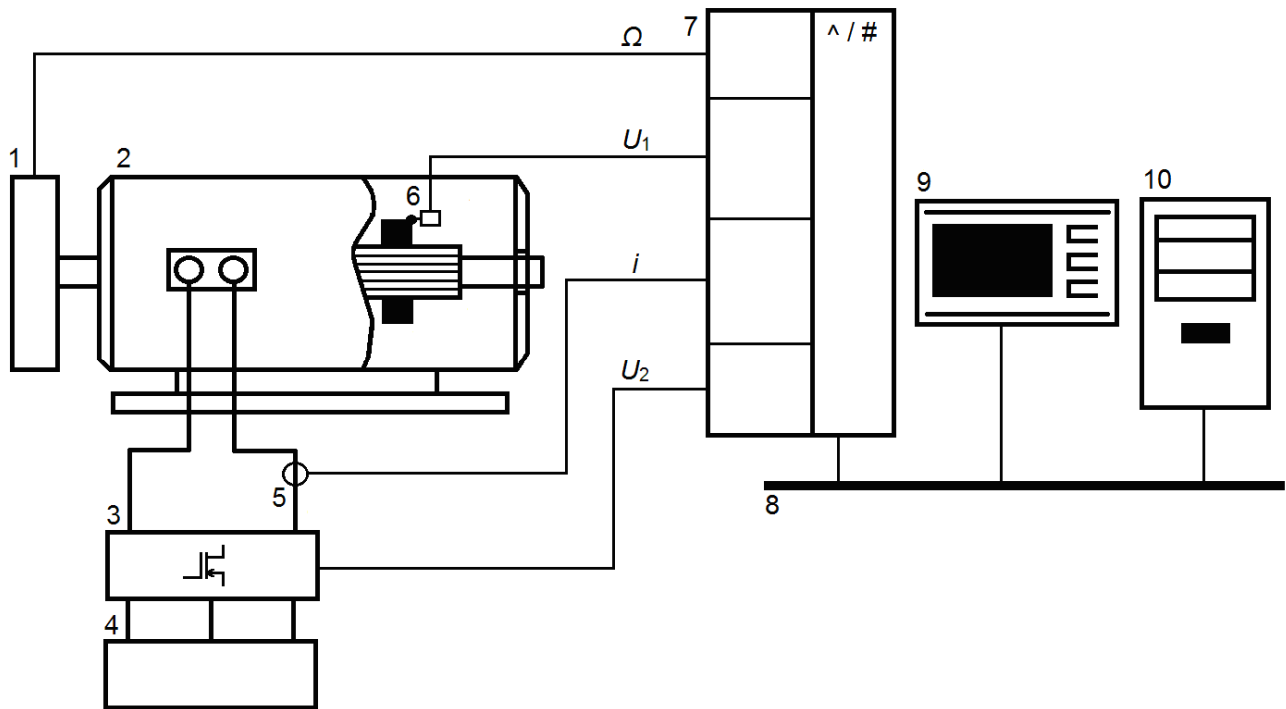


Рисунок 3.11 – Функциональная схема системы контроля износа ЩКУ, 1 – датчик угловой скорости ротора, 2 – коллекторная электрическая машина, 3 – преобразователь напряжения, 4 – нагрузка, 5 – датчик тока якорной обмотки, 6 – датчик предельного значения рабочей длины щеток, 7 – контроллер, 8 – шина данных, 9 – панель оператора, 10 – компьютер

- при формировании контрольного сигнала с выхода датчика предельной длины щеток в момент времени t_1 запоминает значения полного времени работы τ_1 и остаточного ресурса $T(\tau_1)$.

В формуле (3.3) для вычисления остаточного ресурса слагаемые в правой части имеют следующий смысл:

- T_0 - полный номинальный ресурс работы щеток, соответствующий техническим условиям;

- $k_1 \int_0^{\tau} \Omega(t) dt$ - составляющая, характеризующая механическое изнашивание

щеток;

- $k_2 \int_0^{\tau} i^2(t) dt$ - составляющая, характеризующая электрическое изнашивание

щеток;

- $k_3 \int_0^{\tau} e^{\frac{i-i_0}{i_0}} dt$ - составляющая, характеризующая изнашивание щеток при

малых токах.

Данные о полном времени работы τ , величине остаточного ресурса $T(\tau)$ и моменте t_1 формирования контрольного сигнала по шине 8 передаются в компьютер 10 для регистрации, хранения и отображаются с помощью монитора 9.

Силовые трансформаторы и обмотки асинхронных двигателей

Основной функцией локального ИДМ силового трансформатора является вычисление его остаточного ресурса [104, 105], а также производной от этой величины – скорости износа трансформатора.

По ГОСТу остаточный ресурс силового трансформатора оценивается на основании температуры наиболее нагретой точки [106] по формуле:

$$\int_0^t e^{\mu(\theta_n - \theta_H)} dt,$$

где t – время включенного состояния; $\mu = 0,116$ – коэффициент пропорциональности, характеризующий температурный износ; $\theta_H = 98^\circ C$.

На ресурс силового трансформатора оказывает влияние комплекс различных факторов. Так, при проведении диагностики силовых трансформаторов применяются такие методы, как вибродиагностика, измерение частичных разрядов в трансформаторе, анализ полей рассеивания, анализ термомеханического разрушения изоляции и другие.

Концепция ИДМ мехатронных компонентов карьерного экскаватора предполагает проведение непрерывного контроля жизненного цикла соответствующего компонента, поэтому целесообразно реализовать в нем те функции, выполнение которых требует непрерывного контроля определенных параметров. К таким функциям относится контроль теплового и термомеханического разрушения изоляции.

Функциональная схема системы контроля ресурса силового трансформатора приведена на рисунке 3.12.

Работа схемы контроля ресурса силового трансформатора происходит следующим образом. Сигналы с датчиков температуры трансформатора 2 и температуры окружающей среды 3 трансформатора 1 поступают на входы контроллера 5.

Контроллер 5 выполняет следующие функции:

- аналого-цифровое преобразование сигналов, поступающих с датчиков температуры 2 и 3;
- вычисление полного времени работы силового трансформатора;
- вычисление остаточного ресурса трансформатора по формуле (3.4).

$$T(\tau) = T_0 - k_1 \int_0^t e^{\mu(\theta_n - \theta_n)} dt - k_2 n(\tau); \quad (3.4)$$

- в формуле (3.4) для вычисления остаточного ресурса слагаемые в правой части имеют следующий смысл:

- T_0 - полный номинальный ресурс работы трансформатора, соответствующий техническим условиям;

- $k_1 \int_0^t e^{\mu(\theta_n - \theta_n)} dt$ - составляющая, характеризующая тепловое разрушение изоляции обмоток трансформатора;

- $k_2 n(\tau)$ - составляющая, характеризующая механическое изнашивание изоляции обмоток трансформатора.

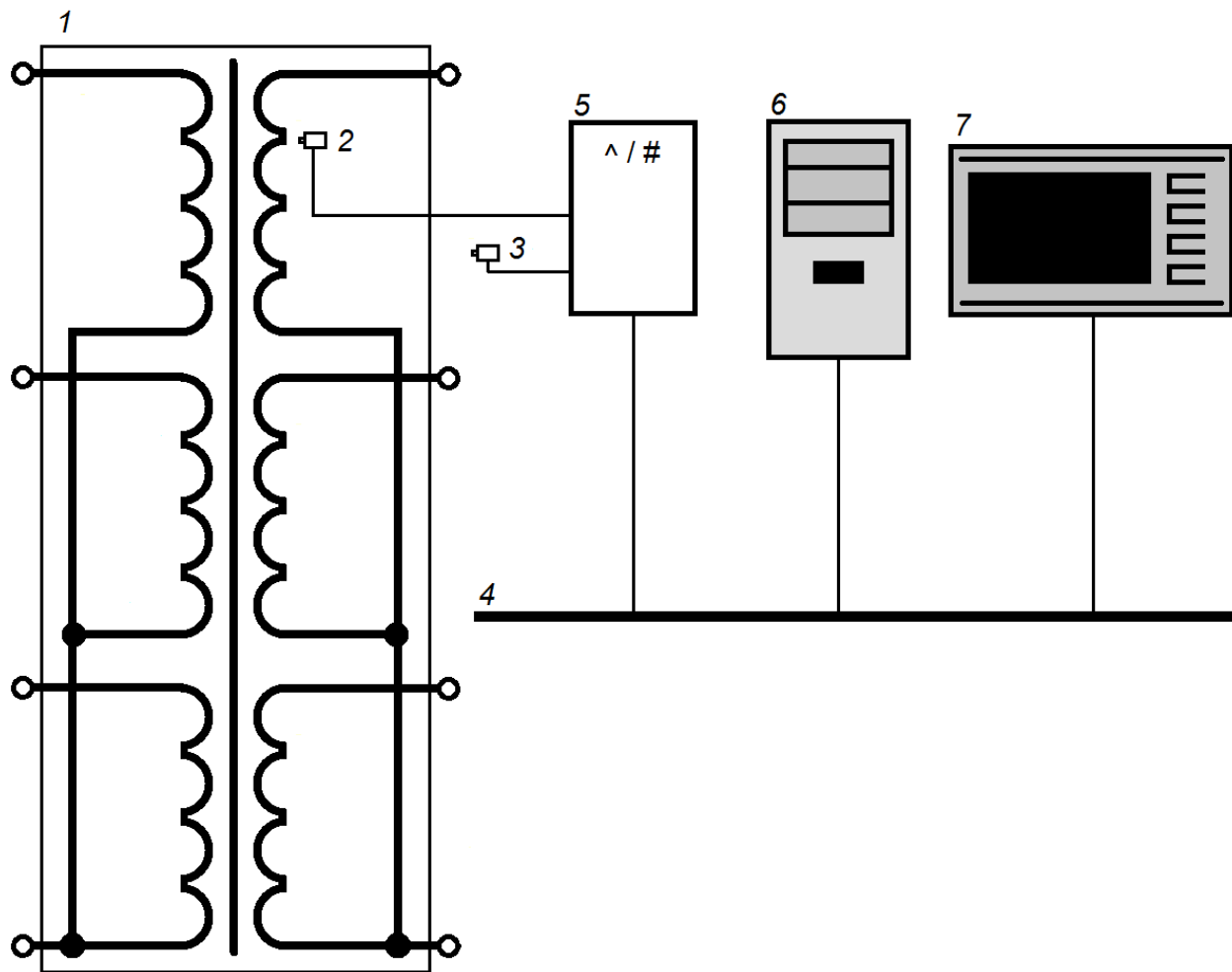


Рисунок 3.12 – Функциональная схема системы контроля ресурса силового трансформатора, 1 – силовой трансформатор, 2 – датчик температуры трансформатора, 3 – датчик температуры окружающей среды, 4 – шина данных, 5 – контроллер, 6 – промышленный компьютер, 7 – монитор

Данные о полном времени работы τ и величине остаточного ресурса $T(\tau)$ по шине 4 передаются в компьютер 6 для регистрации, хранения и отображаются с помощью монитора 7.

Многие современные карьерные экскаваторы (например, ЭКГ-32Р) оснащаются двигателями переменного тока, в частности, асинхронными машинами. Наиболее распространенной причиной поломки АД является перегрев подшипников и разрушение изоляции обмоток ротора и статора.

Рассмотренный способ контроля ресурса изоляции силового трансформатора может быть использован для контроля состояния обмоток АД,

ведь, по существу, разрушение обмоток как в трансформаторе, так и в АД происходит по одним и тем же причинам.

Автоматические выключатели

В настоящее время в экскаваторной технике актуальна задача определения ресурса автоматических выключателей (АВ), используемых для коммутации нагрузок. По ГОСТ Р 52565-2006 остаточный ресурс АВ оценивают по количеству срабатываний выключателя при перегрузках с учетом коммутируемого тока [107, 98].

Рассмотрим разработанный автором уточненный способ определения остаточного ресурса АВ [108]. Функциональная схема системы контроля остаточного ресурса АВ представлена на рисунке 3.13.

Сущность способа заключается в следующем. Физический ресурс АВ при его работе расходуется в результате изнашивания механических и электрических компонентов при воздействии протекающих токов, механических ударных нагрузок и электромеханических коммутационных процессов при отключениях. Интенсивность изнашивания определяется энергией воздействия на выключатель и может быть представлена суммой двух составляющих: электромеханической – при отключениях, и электрической – при протекании тока в рабочем режиме. Электромеханическая составляющая изнашивания возникает при отключениях и зависит от величины разрываемого тока при коммутации. Электрическая составляющая изнашивания пропорциональна тепловым потерям и, следовательно, интегралу от квадрата тока.

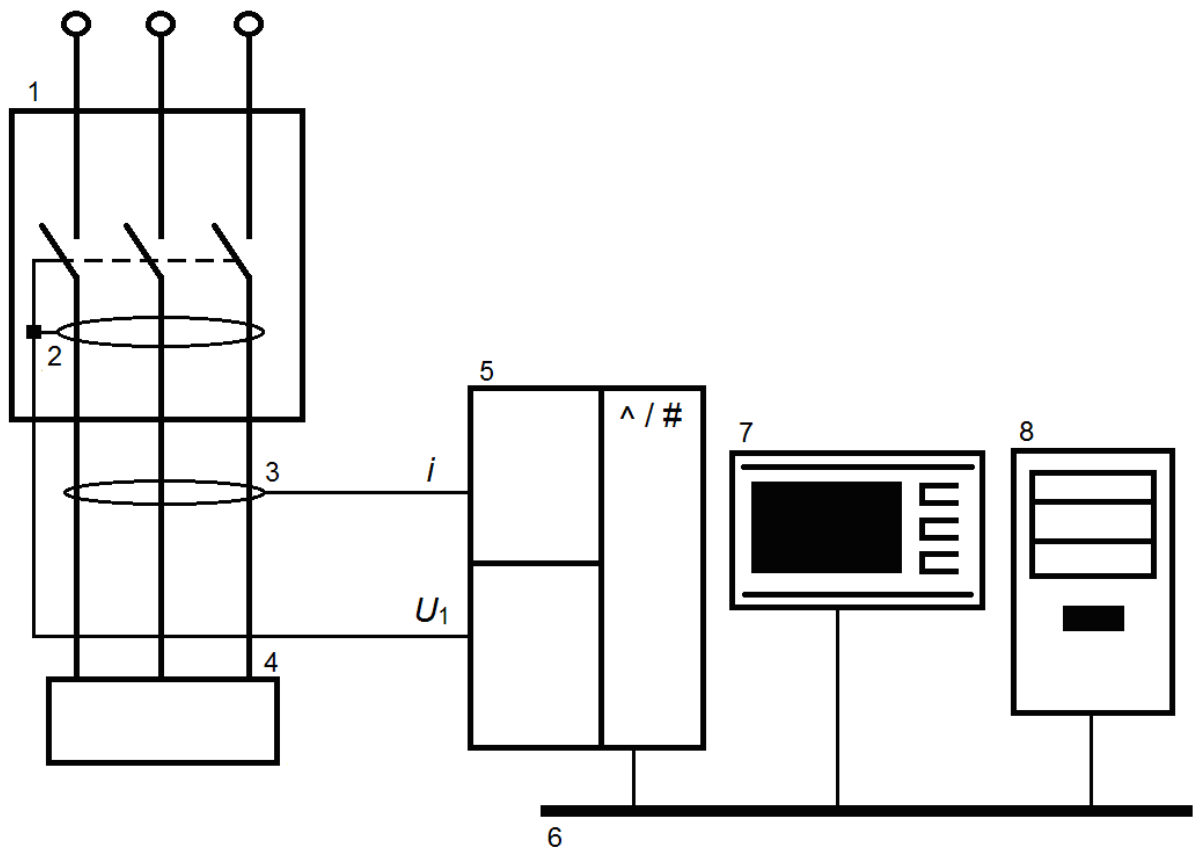


Рисунок 3.13 – Функциональная схема системы контроля остаточного ресурса АВ,
 1 – автоматический выключатель, 2 – датчик срабатывания выключателя, 3 – датчик тока, 4 – нагрузка, 5 – контроллер, 6 – шина данных, 7 – панель оператора, 8 – компьютер

Вычисление остаточного ресурса АВ производится непрерывно в режиме реального времени с помощью микроконтроллерного устройства, на вход которого поступают сигналы с датчика тока, протекающего через выключатель, и сигналы датчика срабатывания защиты. Контроллер выполняет аналого-цифровое преобразование выходного сигнала датчика тока; запоминание значения тока i_j , автоматического выключателя, вызвавшего его срабатывание, при каждом j -ом отключении, $j=1, \dots, n$, и вычисление коэффициента $k_1(i_j)$ в зависимости от тока; отсчет времени от начала эксплуатации АВ; вычисление остаточного ресурса АВ по формуле:

$$T(t) = T_0 - \sum_{j=1}^n k_1(i_j) - k_2 \int_0^t i^2 dt,$$

где T_0 – полный ресурс АВ, k_2 – коэффициент пропорциональности, равный расчетному коэффициенту ресурсного изнашивания АВ, t – время работы АВ от начала эксплуатации, n – общее число срабатываний АВ от начала эксплуатации.

Таким образом, в процессе эксплуатации автоматического выключателя непрерывно производится оценивание его остаточного ресурса с учетом электромеханической и электрической составляющих. Текущая оценка хранится в памяти контроллера, отображается на мониторе и может использоваться для своевременной замены или ремонта автоматического выключателя [107].

3.7. Предоставление данных, хранящихся в ИДС, конечным пользователям

Визуализация ресурса различных узлов машины требует следующего подхода: удобно представить экскаватор в виде карты (Рисунок 3.14), на которой размещены различные узлы: двигатели, ячейка высоковольтного ввода, трансформаторы, автоматические выключатели и т.д. Ресурс можно отобразить цветом, например, зеленый говорит об исправности узла, синий - о повышенном износе (или, например, в случае ячейки высоковольтного ввода - о неполадках в сети), а красный - об аварии.

Кроме непосредственно ресурса, важным параметром является скорость его изменения, например, если износ двигателя резко увеличивается, необходимо определить, что является тому причиной. Здесь удобно использовать представление в текстовой форме, когда по запросу оператора формируется отчет, содержащий возможные причины проблемы, а также комментарий, сообщающий, по какой причине интеллектуальная диагностическая система пришла к такому выводу (рисунок 3.15). Генерация подобных отчетов возможна благодаря использованию нейронных сетей, которые способны выявить сложные зависимости в работе мехатронного комплекса машины.

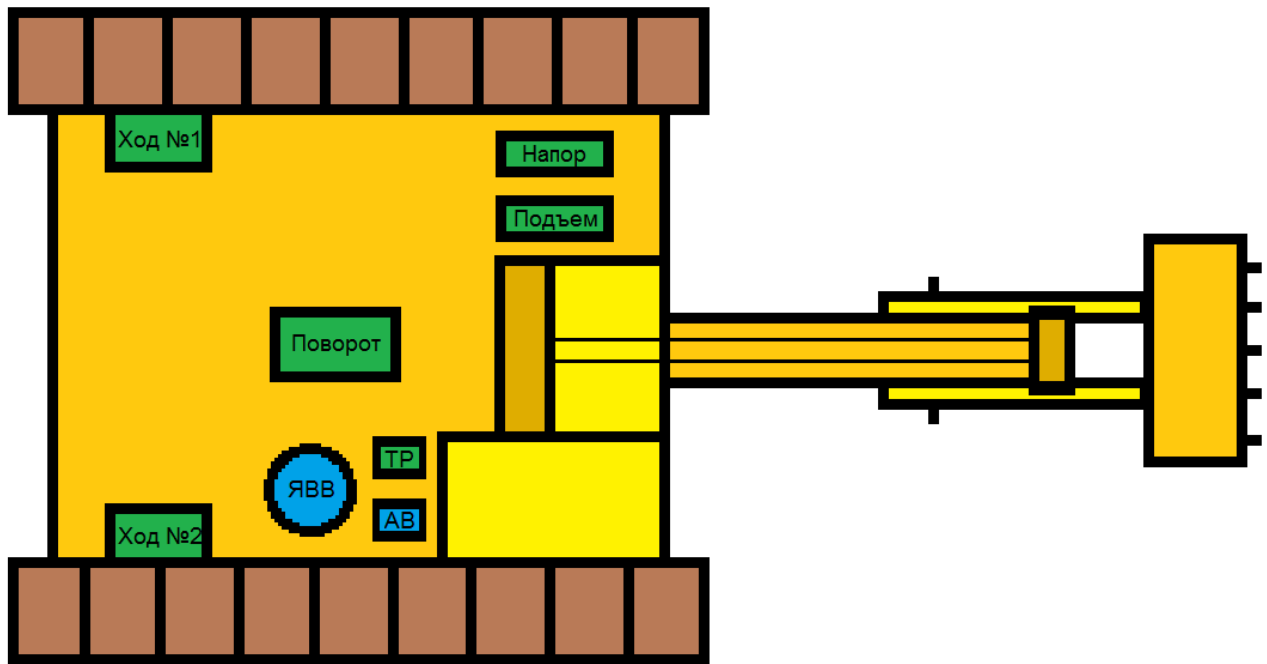


Рисунок 3.14 – Карта ресурса узлов экскаватора, ЯВВ – ячейка высоковольтного ввода, ТР – силовые трансформаторы, АВ – блок автоматических выключателей

В рассмотренном выше способе контроля и визуализации работы ЩКУ машины постоянного тока предлагается осуществлять визуализацию в следующем виде (рисунок 3.16):

- механическая характеристика машины постоянного тока в виде графика;
- параметры, характеризующие работу ЩКУ, а именно длину щеток, температуру коллектора, уровень искрения и коэффициенты корреляции в числовом виде;
- искрение отображается в виде цветных анимированных «искр» голубого и зеленого цвета (картина формируется на основании численных значений бальности искрения и коэффициентов корреляции);
- режим работы машины, а также общий отчет об изменении ее состояния представляется в текстовой форме

Отчет

Номер экскаватора: 001
Дата: 15.11.2014
Время: 15:29
Выявлено нарушений в работе: 1

1. Неисправность линии электропередач
Причина: пониженное напряжение источника ЭДС
Ход решения:

1.1 Выявлены '4' аварийных отключения экскаватора:

- 13.11.2014 8:40 (низкое напряжение сети)
- 14.11.2014 13:32 (низкое напряжение сети)
- 15.11.2014 8.10 (низкое напряжение сети)
- 15.11.2014 15.05 (низкое напряжение сети)

1.4 Выявлены '0' предаварийных ситуаций

1.2 Сопротивление ЛЭП:

- мин. 13.11.2014 8:02 - 8.32 Ом
- макс. 15.11.2014 14:25 - 11.2 Ом
- норм. - 10.0 Ом

1.3 Напряжение ЛЭП:

- мин. 15.11.2014 15:04 - 5400 В
- макс. 13.11.2014 17:20 - 5700 В
- норм. - 6200 В

Рисунок 3.15 – Пример отчета о состоянии экскаватора

Если непосредственное взаимодействие оператора экскаватора и самой машины целесообразно осуществлять через панель оператора (как правило, имеющей сенсорный экран), то сценариев удаленного доступа к экскаватору существует множество, рассмотрим некоторые из них.

Удаленный доступ с персонального компьютера требует наличия Internet-соединения, кроме того, интерфейс ПО должен быть адаптирован для работы с помощью клавиатуры и мыши.

Удаленный доступ с планшетного компьютера, также требует наличия Internet-соединения. В настоящее время существует два вида планшетных ПК: на базе процессорной архитектуры ARM и x86. Первые требуют специального ПО и несовместимы с ПО для стационарных компьютеров и ноутбуков. Последние

представляют собой уменьшенную копию стационарных ПК, их основное отличие заключается в наличии сенсорного экрана и отсутствии аппаратной мыши и клавиатуры.

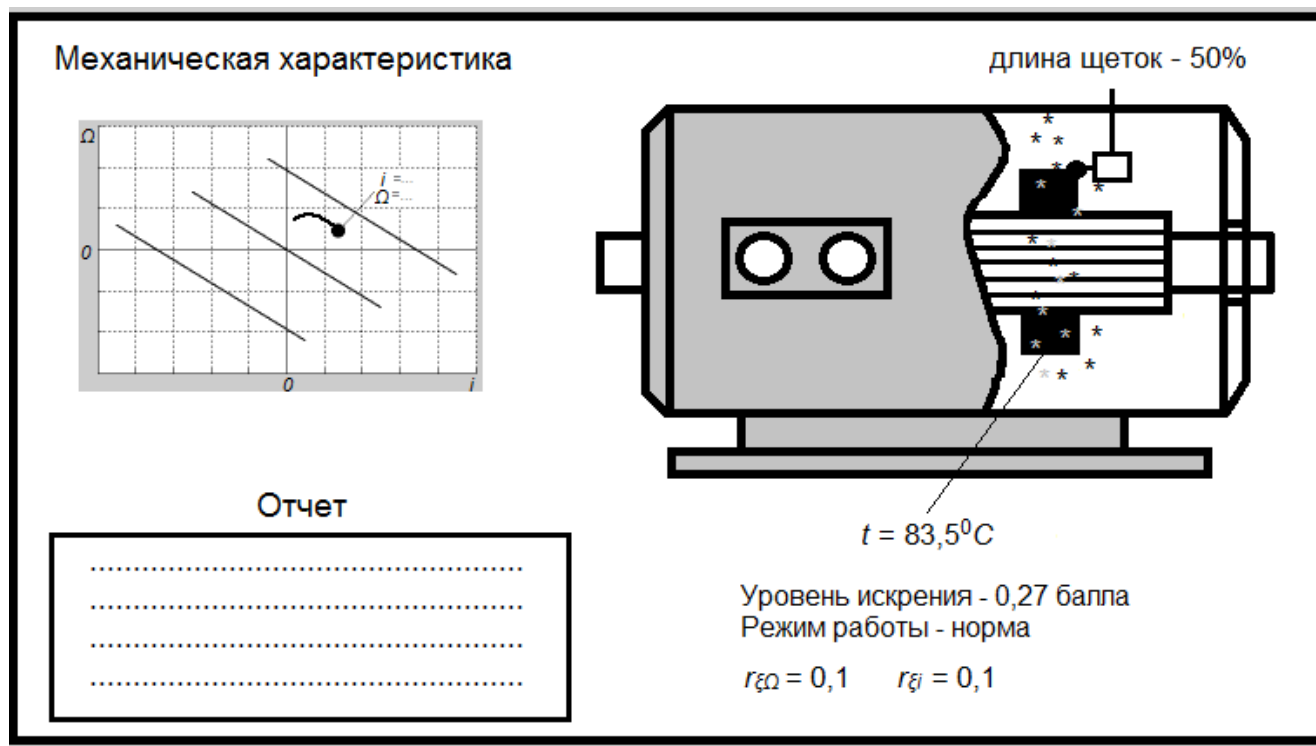


Рисунок 3.16 – Визуализация работы ЦКУ машины постоянного тока

Удаленный доступ с сотового телефона является одним из наиболее перспективных подходов удаленного доступа. Рассмотрим несколько возможных сценариев удаленного доступа с применением телефонии.

Первый вариант – оповещение персонала с помощью SMS-рассылок. Если на экскаваторе происходит какой-то сбой в работе, то по заранее указанным номерам осуществляется рассылка SMS-сообщений с указанием номера экскаватора, времени выявления неисправности и возможных причин ее возникновения.

Второй вариант – запрос отчета о работе одной из подсистем экскаватора с помощью SMS-запроса. Для того, чтобы получить такой отчет, специалист должен отправить SMS-сообщение с указанием номера экскаватора и номера (или названия) подсистемы, о которой он хочет получить отчет. Интеллектуальное ПО

бортового компьютера экскаватора, после получения такого запроса, производит его обработку, на основании чего формирует ответное SMS-сообщение.

Третий вариант – это использование автоответчика. При таком сценарии, специалист осуществляет звонок на номер, закрепленный за одним или несколькими экскаваторами. С помощью голосового меню автоответчик позволяет специалисту выбрать и прослушать необходимую информацию. Навигация по меню осуществляется с помощью цифровых клавиш мобильного телефона.

Четвертый вариант – аналогичен третьему, с одним отличием: при звонке на номер автоответчик «сбрасывает» звонок и через несколько секунд перезванивает специалисту. Такой вариант имеет одно существенное преимущество: со специалиста не взимается плата за звонок. Такой сценарий весьма актуален, если например, специалист находится в России, а экскаватор - за рубежом.

Очевидным преимуществом технологии телефонной связи является ее практически круглосуточная доступность. Это преимущество, несомненно, способствует повышению оперативности диагностирования неполадок в работе экскаватора и, как следствие, их скорейшему устранению.

Мехатронный комплекс экскаватора не имеет подключения к телефонной связи в классическом ее понимании. Однако существует множество «облачных» сервисов телефонии, обеспечивающих все необходимые функции посредством Internet-соединения. К таким функциям относятся: прием и передача SMS, автоответчик, обратный звонок и др. Одним из наиболее популярных облачных сервисов телефонной связи является Twilio [109]. Данный сервис может работать в двух режимах: полнофункциональном (коммерческом) и в сокращенном (бесплатном), подходящем для тестирования и отладки пользовательских приложений. У сервиса Twilio существуют как зарубежные, так и российские аналоги, среди последних можно отметить SMS Aero и SMS Центр [110].

3.8. Моделирование контрольно-диагностических функций системы «Электронный машинист»

С целью анализа состояния всех компонентов мехатронного комплекса, разработана Simulink-модель мехатронного комплекса карьерного экскаватора, включающая в себя четыре электропривода постоянного тока (подъем, напор, поворот и ход), силовой трансформатор, автоматический выключатель (см. рисунок 3.17), а также модели физической надежности каждого из этих компонентов. Необходимость построения обобщенной модели обусловлена тем, что компоненты мехатронного комплекса экскаватора находятся в тесном взаимодействии, и оказывают значительное влияние друг на друга, поэтому рассмотрение каждого из них по отдельности не позволяет получить целостную картину работы системы.

Модели приводов (см. рисунок 3.18 и 3.19) включают математическое описание двигателей, систем управления, редукторов и механических нагрузок. Модель механической части представлена в виде двухмассовой системы. Модели управляющих систем построены на основе типовых структур многодвигательных и однодвигательных приводов главного движения экскаватора, разработанных в ООО «Компания Объединенная Энергия» [111].

Для математического описания силового трансформатора использована его тепловая модель (см. рисунок 3.20).

Модель автоматического выключателя в простейшем случае обеспечивает мгновенное отключение электрооборудования от сети при перегрузке. Разработанная модель дополнительно учитывает еще один сценарий: перегрев автоматического выключателя, это происходит, когда ток потребления несколько превышает номинальный (например, на 20%) в течение длительного интервала времени [112].

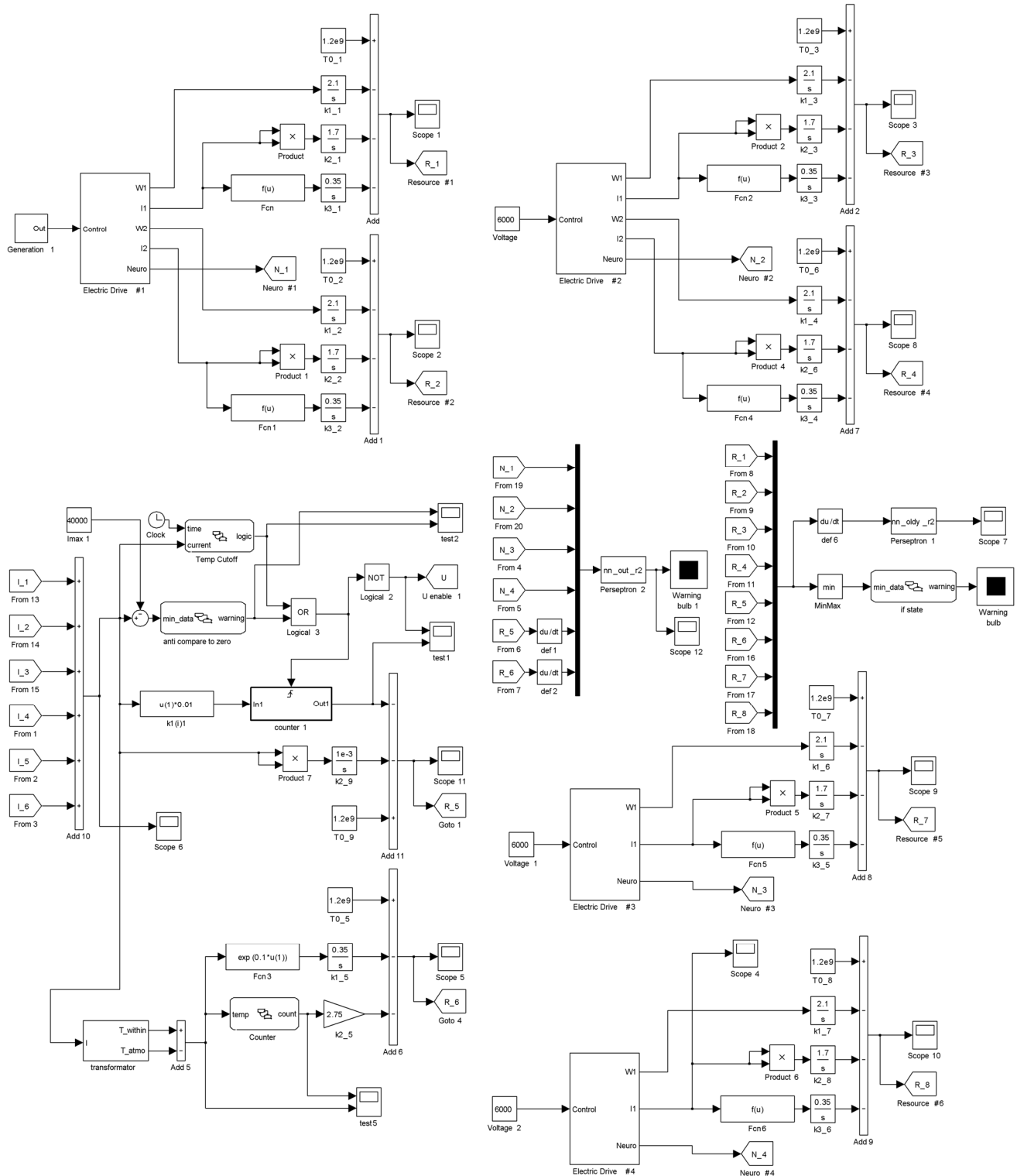


Рисунок 3.17 – Simulink-модель мехатронного комплекса карьерного экскаватора, оснащенного элементами информационно - диагностического комплекса системы «Электронный машинист»

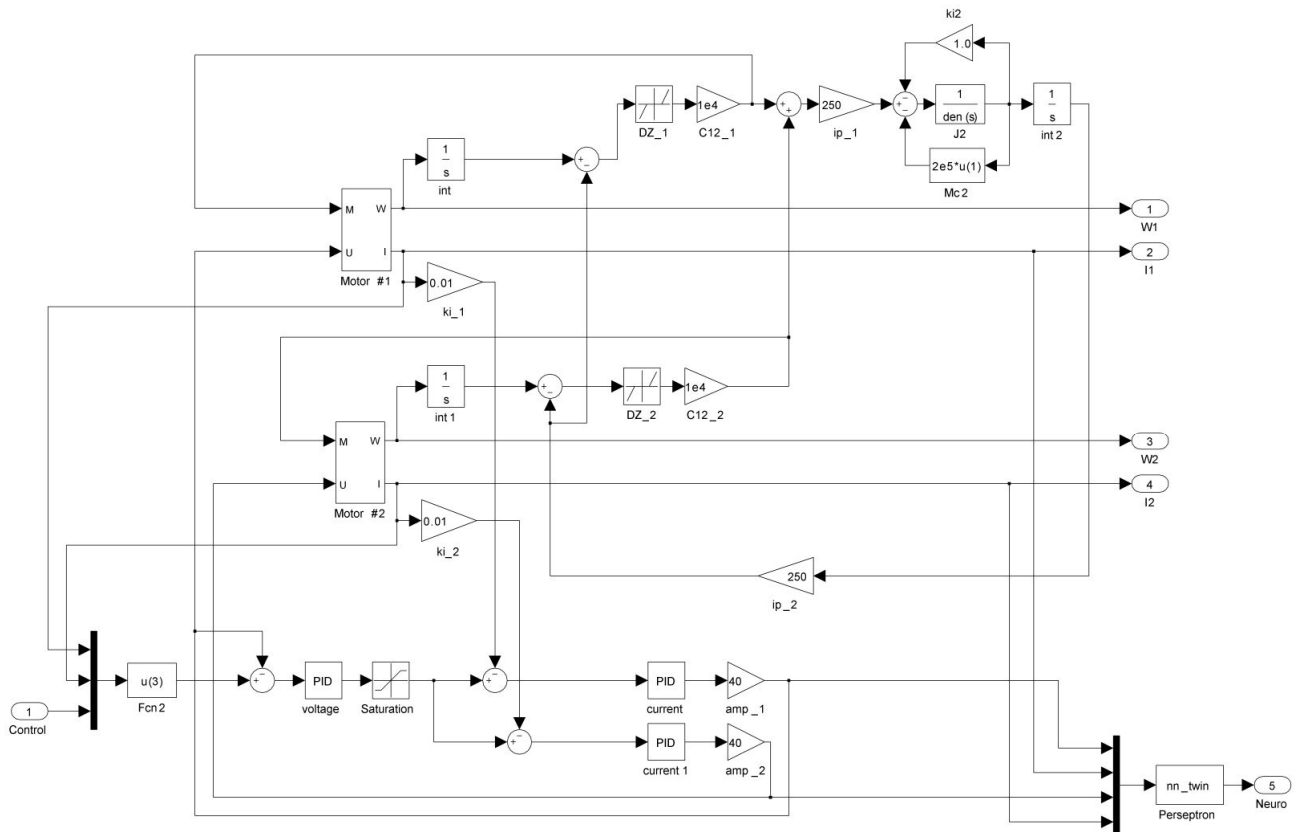


Рисунок 3.18 – Simulink-модель двухдвигательного электропривода карьерного экскаватора

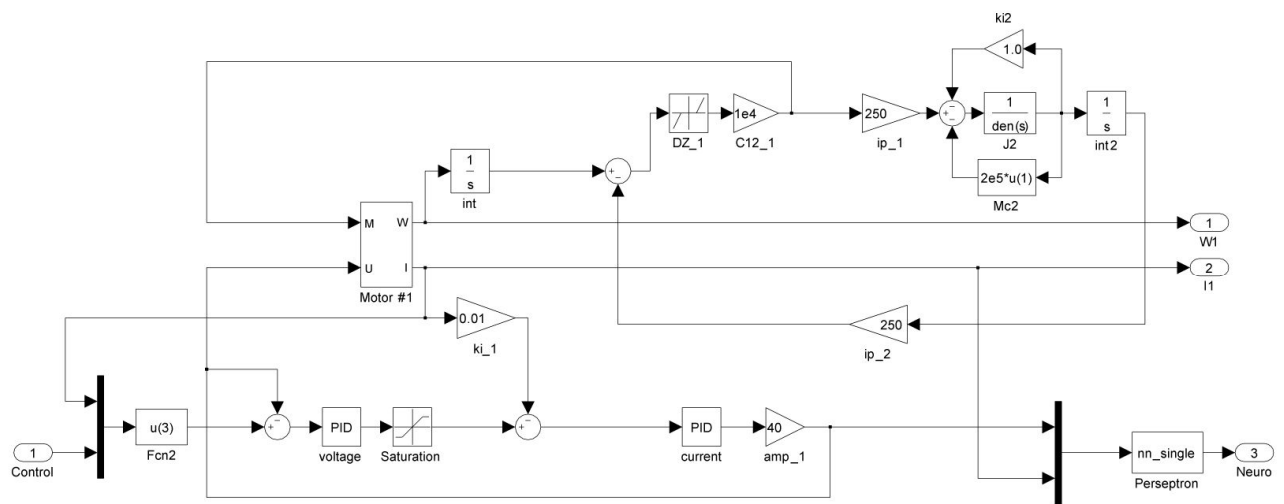


Рисунок 3.19 – Simulink-модель однодвигательного электропривода карьерного экскаватора

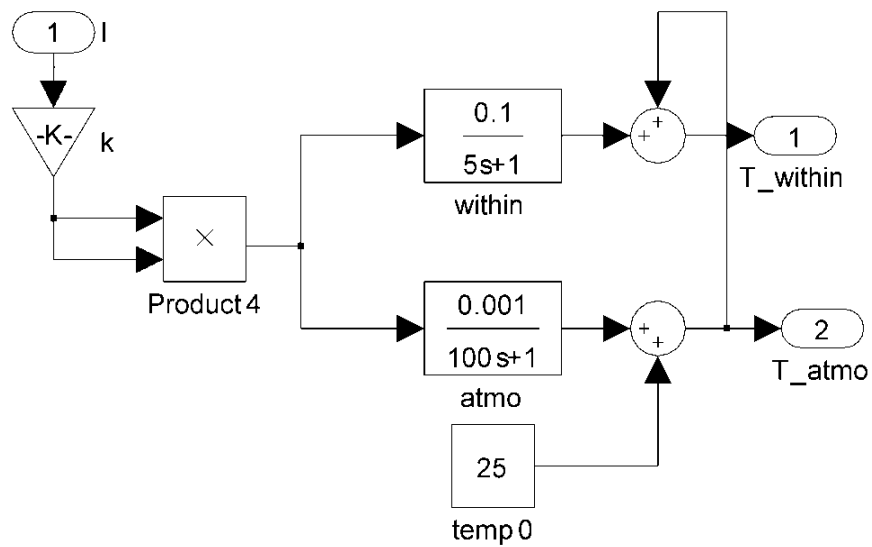


Рисунок 3.20 – Simulink-модель силового трансформатора

Автоматический выключатель – это дискретная система, поэтому при составлении его модели использованы логические правила (см. рисунок 3.21 и 3.22).

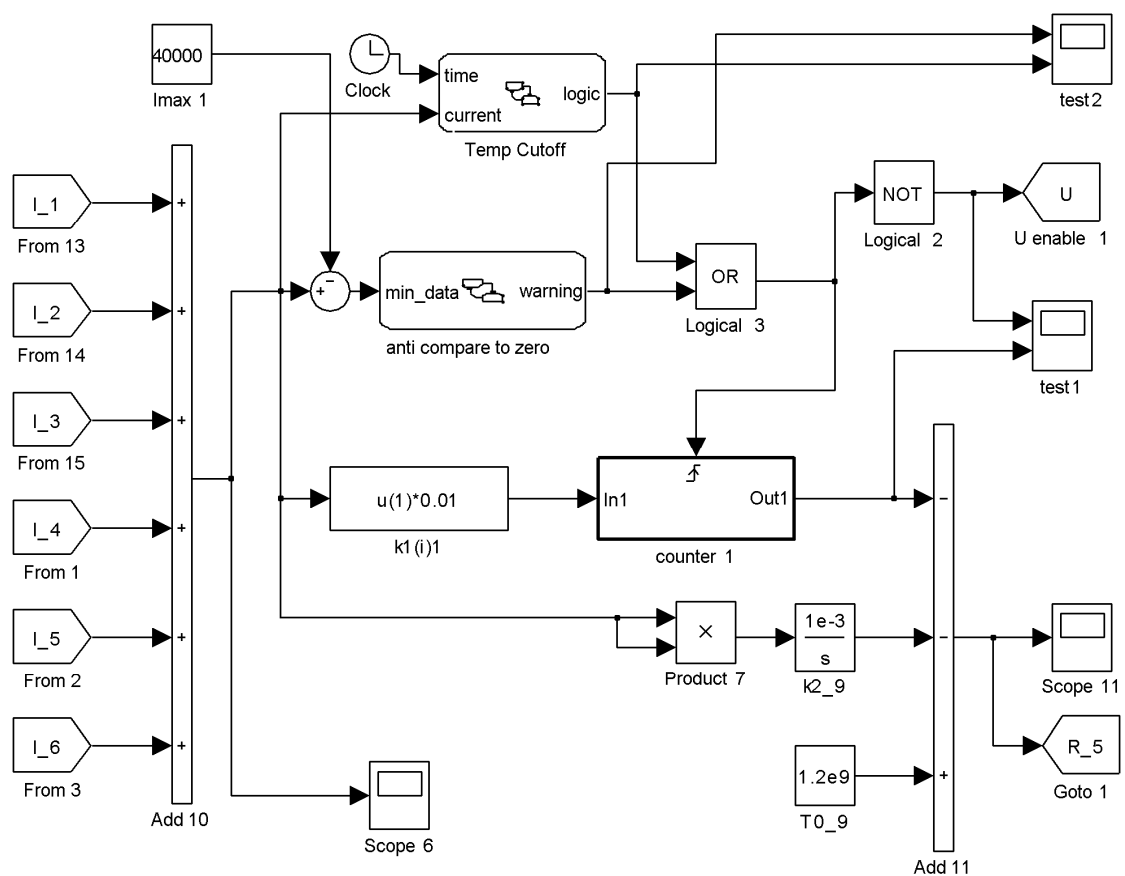


Рисунок 3.21 – Simulink-модель автоматического выключателя

При моделировании активно применялись логические правила (простые логические блоки, а также компоненты библиотеки *flowchart* среды *Matlab*).

Рассмотренные подсистемы карьерного экскаватора относятся к уровню АСУ. Перейдем к рассмотрению контрольно-диагностической системы уровня АСУ ТП.

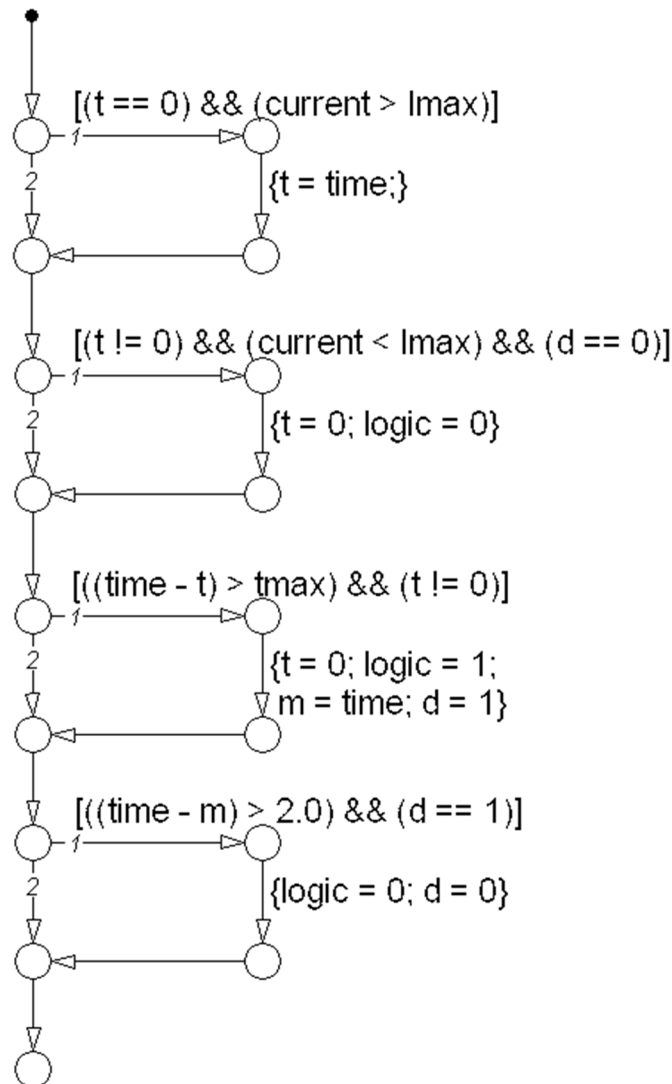


Рисунок 3.22 – Модель логического контроллера автоматического выключателя, имитирующая защиту АВ от перегрева

Сигналы об остаточном ресурсе каждого из компонентов мехатронного комплекса собираются в логический контроллер, который при выходе, хотя бы одной из подсистем экскаватора из области нормальных значений, сигнализирует о необходимости проведения обслуживания (см. рисунок 3.23).

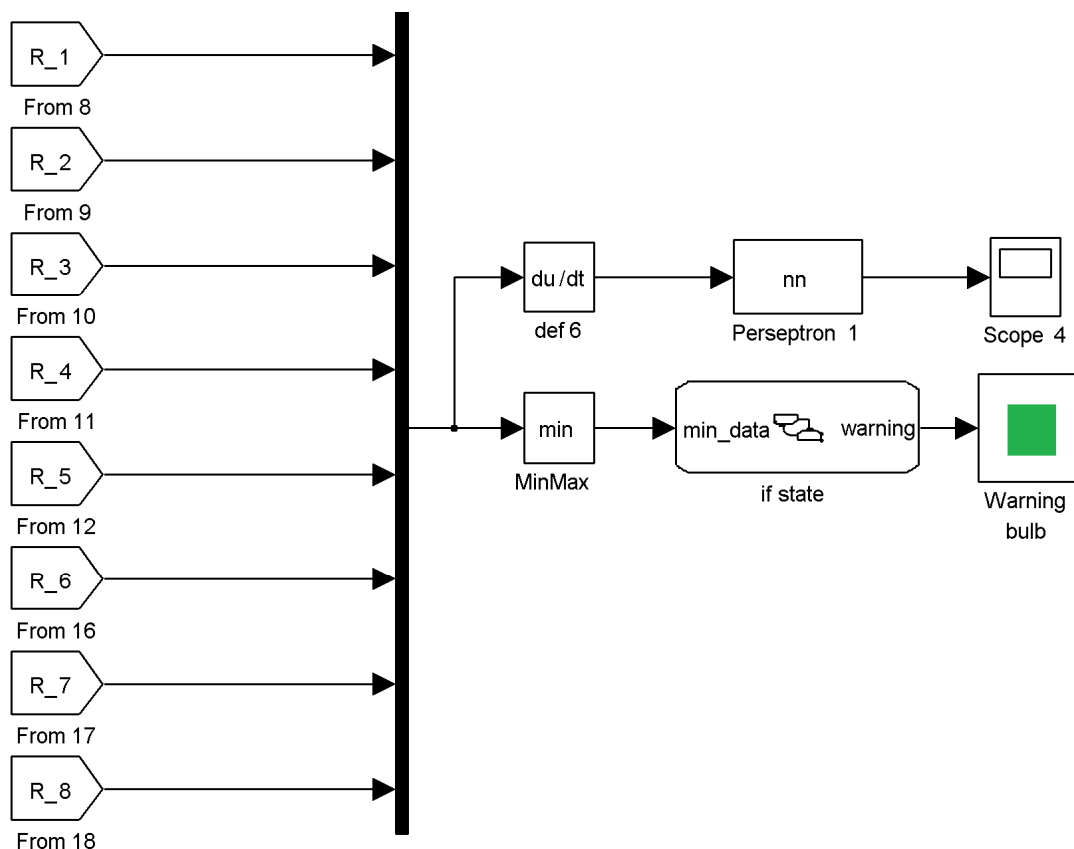


Рисунок 3.23 – Simulink-модель логического контроллера, предназначенного для оценки ресурса узлов экскаватора

Помимо непосредственно истощения ресурса узлов экскаватора, интерес представляет еще и скорость его истощения. Данный параметр для каждой из подсистем экскаватора также подвергается оценке и, в случае недопустимо высокой скорости истощения ресурса хотя бы одного из компонентов, осуществляется сигнализация.

Оценка состояния компонентов мехатронного комплекса экскаватора может быть проведена с применением нейронных сетей. В предложенной модели нейронные анализаторы [113] установлены на каждом электроприводе (см. рисунки 3.18 и 3.19).

Сигналы с каждого из нейронных анализаторов, а также значения скорости изменения ресурса силового трансформатора и автоматического выключателя, поступают на выходной нейронный анализатор (рисунок 3.24).

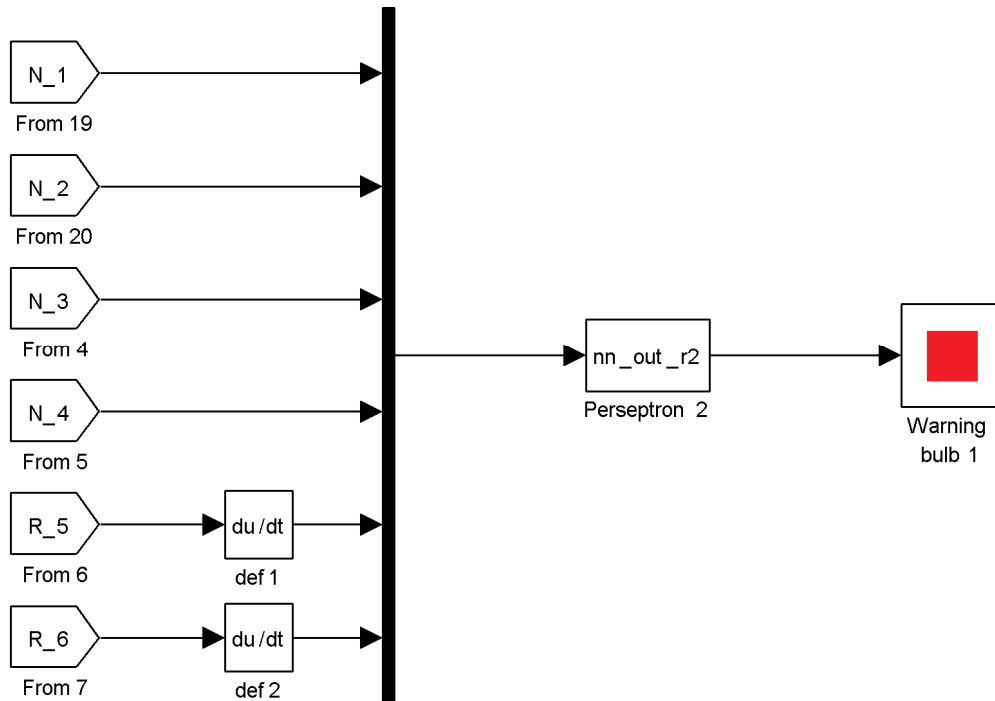


Рисунок 3.24 – Simulink-модель выходного нейронного анализатора

Выходной нейронный анализатор производит оценку текущего состояния оборудования и, в случае возникновения неполадок, сигнализирует об этом.

Нейронные сети, используемые в настоящей работе, имеют топологию двухслойных рекуррентных персептронов [114, 115, 116, 117, 118, 113, 119, 120, 121, 122], обученных для решения классической задачи распознавания образов [123, 124]. Для обучения каждого персептрона требуется два массива значений – входной и желаемый (выходной). Массив желаемых значений является многомерным и отражает желаемое числовое значение (например, ноль или единица) для каждого из выходных нейронов внешнего слоя в определенные моменты времени.

Для создания и обучения нейронной сети необходимо, во-первых, произвести передискретизацию массивов входных и желаемых сигналов таким образом, чтобы количество строк в каждом массиве было одинаковым, а во-вторых – создать нейронную сеть с помощью приложения *nftool* или

непосредственно из командной строки MatLab [117]. Интерфейс программы *nftool* представлен на рисунке 3.25.

После того, как нейронная сеть создана, необходимо произвести ее обучение. Затем нужно сохранить обученную таким образом нейронную сеть и провести ее тестирование на наборе данных, отличном от того, с помощью которого производилось обучение. Это необходимо для исключения проявления «эффекта памяти». Пример сопоставления отклика нейросети с требуемым откликом приведен на рисунке 3.26.

Обученная и протестированная нейронная сеть сохраняется в отдельный файл. Такой файл используется при моделировании в режиме реального времени. *Matlab* также поддерживает возможность использования созданных в нем нейронных сетей в сторонних приложениях.

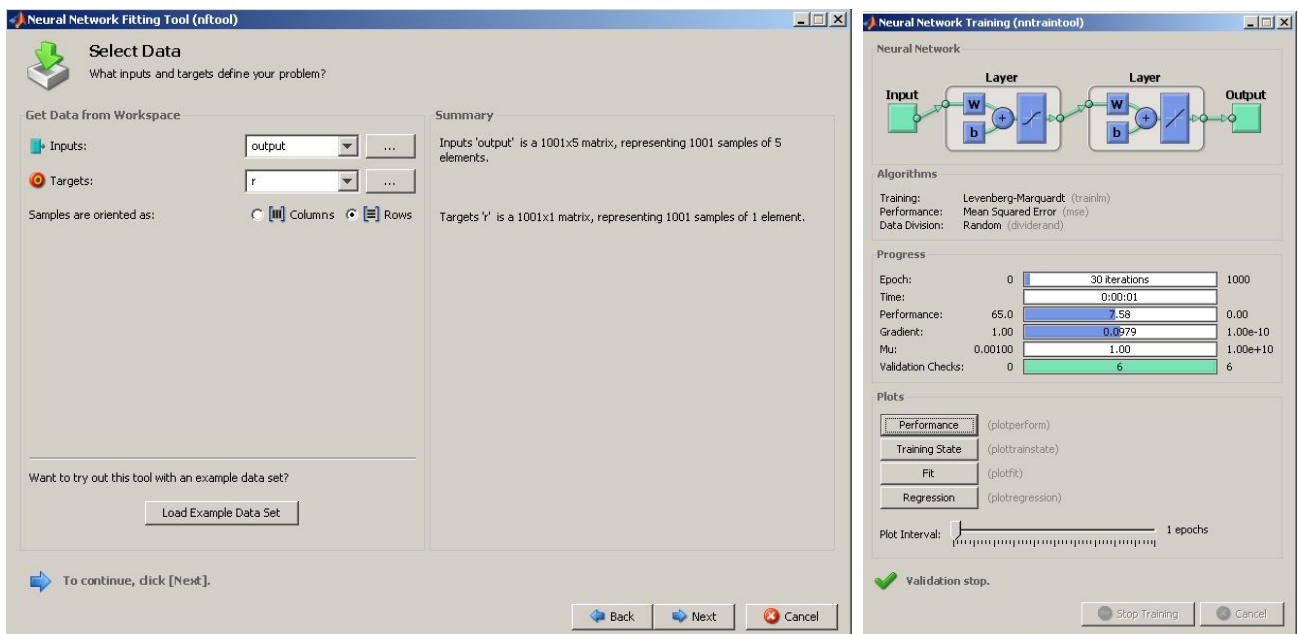


Рисунок 3.25 – Интерфейс программы *nftool*

Рассмотрим структуру нейронной сети, анализирующей состояние двухдвигательного электропривода, приведенного на рисунке 3.18. Нейронная сеть построена по топологии рекуррентного двухслойного персептрона, ее структурная схема представлена на рисунке 3.27. На входы (рецепторы) нейросети поступают нормализованные значения токов и напряжений (всего 4

входа, номер входа обозначен, как i), таким образом $x_{i,j}$ – это состояние i -го рецептора в момент времени j (глубина памяти персептрона – n). Далее сигналы поступают на внутренний (ассоциативный) слой нейросети, где происходит суммирование сигналов с учетом весовых коэффициентов $a_i \dots e_i$, получаемых в процессе обучения сети. Функция активации ассоциативного слоя в данном примере является линейной, а внутренние обратные связи – отсутствуют (это, в случае отсутствия необходимости исследования сложных зависимостей сигналов, позволяет значительно повысить производительность работы сети). Внешний (реагирующий) слой нейросети представлен в виде трех нейронов, соответственно для нормального, допустимого и аварийного режимов. Функции активации реагирующих нейронов представляют собой релейные элементы. Весовые коэффициенты выходного слоя в данном случае – это $f_i \dots h_i$.

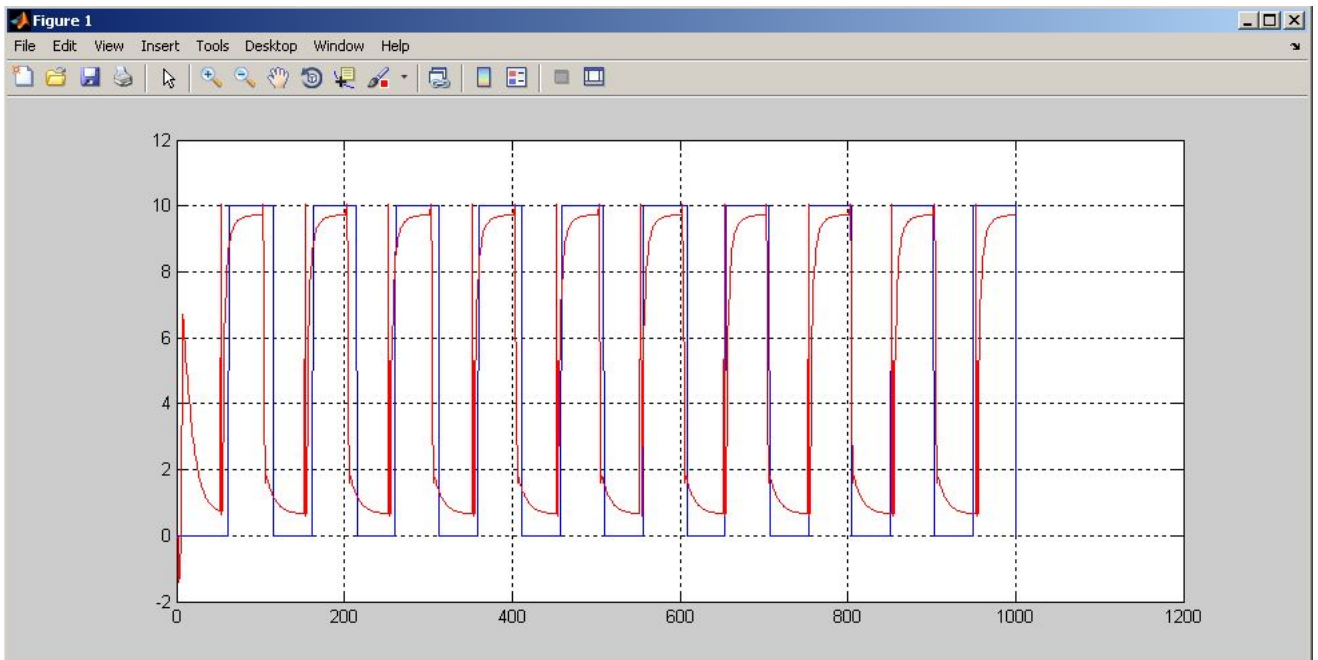


Рисунок 3.26 – Пример ожидаемого и реального отклика нейросети (красным обозначен отклик нейросети до перевода в двоичный формат, синим – ожидаемый отклик)

Нейронная сеть выходного нейронного анализатора аналогична той, что представлена на рисунке 3.27. Отличие состоит в наличии внутренних обратных связей. В данном случае уравнение для y_m имеет следующий вид:

$$y_m = \sum_{i=1..N} a_{i,1}x_{i,1} + a_{i,2}x_{i,2} + \dots + a_{i,n}x_{i,n} + \sum_{i=1..K} b_{i,1}y_{i,1} + b_{i,2}y_{i,2} + \dots + b_{i,n}y_{i,n},$$

где $a_{i,j}$ и $b_{i,j}$ – весовые коэффициенты, N – общее количество рецепторов, K – общее количество скрытых нейронов, $x_{i,j}$ – значение на входе i -го рецептора в момент времени j , $y_{i,j}$ – значение на выходе i -го нейрона скрытого слоя в момент времени j , n – глубина памяти персептрона.

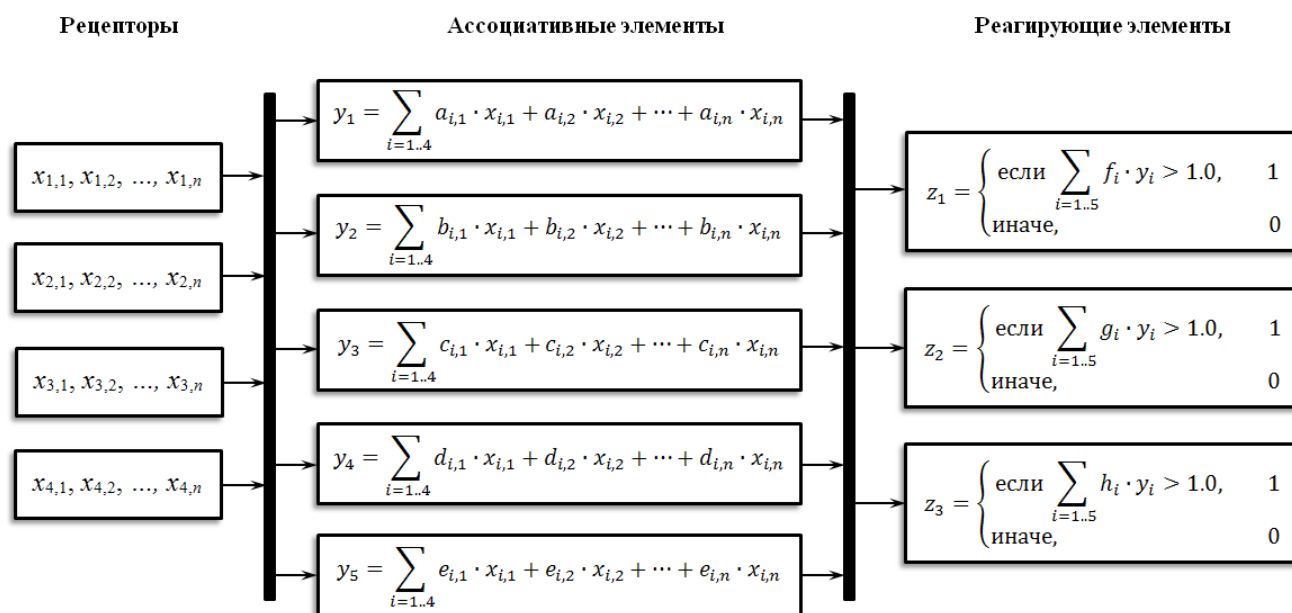


Рисунок 3.27 – Структура нейронного анализатора двухдвигательного электропривода

В результате моделирования были получены данные, свидетельствующие о высокой степени достоверности оценки состояния оборудования: в 90% случаев полученные результаты соответствовали действительности.

При проведении исследований варьировались следующие параметры: напряжение линии электропередачи, питающей экскаватор ($\pm 20\%$ от номинального), температура трансформатора и его обмоток ($\pm 40\%$ от номинальной), сопротивление обмоток роторов ДПТ (20% от номинальной). Дополнительно моделировались ситуации, при которых срабатывали защиты (по току и температуре АВ). В общей сложности проведено 50 экспериментов. В 45 экспериментах нейронные анализаторы адекватно оценили состояние компонентов мехатронного комплекса (норма, перегрузка или авария), 4

эксперимента завершились ложно-положительным аварийным результатом и 1 ложно-отрицательным нормальным результатом.

Полученные модели использованы при разработке информационно - диагностического программного обеспечения для экскаваторов семейства ЭКГ, в т.ч. ЭКГ-10Т, ЭКГ-15Т и ЭКГ-20К.

В дальнейшем предполагается использование разработанной модели при изучении рабочих процессов, протекающих в мехатронном комплексе экскаватора, как трехконтурной следящей системы, имеющей контуры регулирования тока, скорости и положения рабочего органа, где контур положения замкнут через человека-оператора. Одну из наиболее важных работ в данном направлении провел И.Е. Цибулевский, рассматривающий человека в качестве звена следящей системы [125].

3.9. Выводы

1. Предложена структура аппаратной платформы системы «Электронный машинист», основными аппаратными компонентами которой являются локальные ИДМ, компьютер уровня АСУ ТП и телекоммуникационное оборудование.

2. В качестве программного обеспечения системы «Электронный машинист», находящегося на компьютере уровня АСУ ТП, представлены следующие программы: ПО хранения и последующей обработки данных, ПО обработки данных в реальном времени, а также сервисное ПО, отвечающее, в частности, за проверку целостности данных и визуализацию работы подсистем экскаватора.

3. Разработаны алгоритмы работы программного обеспечения, предназначенного для обработки данных располагаемого на компьютере уровня АСУ ТП: алгоритмы оценки эффективности работы экскаватора, алгоритм поиска причин неисправностей, алгоритм оценки ресурса узлов карьерного экскаватора, а также способ контроля массы при погрузке экскаватором грунта в автосамосвал.

4. Разработан новый способ определения параметров линии электропитания экскаватора: активного и реактивного сопротивлений линии, а также напряжения в центре питания.

5. Для основного электрооборудования мехатронного комплекса карьерного экскаватора, к которому относятся электродвигатели постоянного тока, силовые трансформаторы и автоматические выключатели, разработаны новые способы контроля их ресурса.

6. Предложены способы визуализации работы щеточно-коллекторного узла электрической машины, узлов ячейки высоковольтного ввода, а также ресурса узлов экскаватора, отличающиеся повышенной наглядностью и информативностью, что позволяет упростить работу машиниста, повысить безопасность и эффективность работы экскаватора.

7. Предложена методика построения системы взаимодействия с экскаватором посредством телефонии, при котором сам экскаватор при возникновении неисправностей может отправить предупредительное SMS-сообщение обслуживающему персоналу, а персонал, в свою очередь, - запросить данные с экскаватора в ручном режиме посредством SMS-запроса или непосредственно «телефонного звонка экскаватору».

8. Разработана Simulink-модель мехатронного комплекса карьерного экскаватора, ориентированная на решение задач интеллектуального управления, контроля и диагностики.

9. Для ИС мехатронного комплекса карьерного экскаватора разработаны нейронные анализаторы, построенные по топологии рекуррентных двухслойных персептронов, обеспечивающие диагностику неисправностей в работе машины.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

4.1. Аппаратная реализация информационной системы мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора

Аппаратная платформа информационной системы экскаватора, состоит из следующих составных частей:

- центральный компьютер (уровня АСУ ТП);
- локальные ИДМ, каждый из которых включает в себя:
 - датчики параметров, характеризующих работу подсистемы;
 - микропроцессорный (МП) модуль;
 - устройства сопряжения датчиков и МП-модуля;
 - сетевой интерфейс (CAN-bus);
- сетевое оборудование CAN-bus:
 - сетевые карты;
 - коммутационное оборудование;
 - самописец;
- сетевое оборудование Ethernet и Wi-Fi:
 - маршрутизаторы;
 - коммутаторы;
 - сетевые карты;
 - точки доступа Wi-Fi;
 - усилители Wi-Fi сигнала и антенны;
- спутниковое и/или GSM-оборудование, обеспечивающее подключение к сети Internet.

Общая схема подключения оборудования представлена на рисунке 4.1.

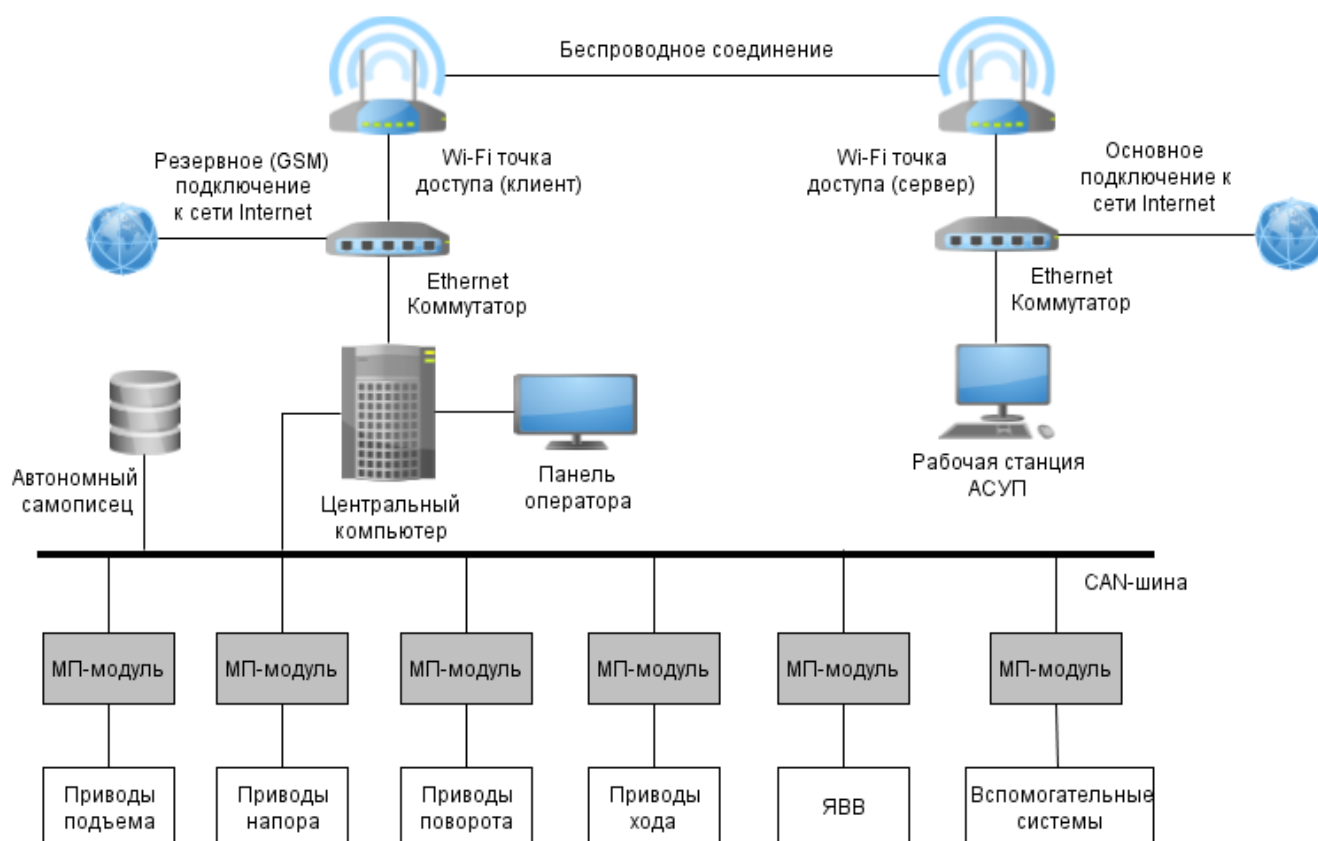


Рисунок 4.1 – Схема подключения оборудования, МП-модуль – микропроцессорный модуль, ЯВВ – ячейка высоковольтного ввода

В качестве центрального компьютера выбран промышленный компьютер NISE-3500-i5520M, его технические характеристики приведены в таблице 4.1. Компьютер обладает высокой производительностью за счет применения современного процессора Inter Core i5 и 4 Гб оперативной памяти DDR3, имеет все необходимые интерфейсы сопряжения, компактную компоновку, устойчивость к вибрации и электромагнитным помехам. Компьютер может быть подключен к совместимому дисплею по интерфейсу D-SUB или DVI, что дает возможность применить в паре с ним любые современные дисплеи, в том числе с сенсорным интерфейсом ввода, например DM-170GS производства компании IEI Technology. Этот дисплей обладает следующими характеристиками:

- диапазон рабочих температур: 0...50⁰С;
- класс защиты – IP65;
- материал корпуса передней панели – алюминий;

- потребляемая мощность – 45 Вт;
- диагональ экрана – 17”;
- разрешение экрана – 1280x1024 точки;
- интерфейс подключения дисплея – VGA и DVI;
- интерфейс подключения дигитайзера – USB и RS-232
- тип дигитайзера – резистивный;

Локальные ИДМ разрабатываются индивидуально для каждого конкретного вида оборудования.

Для интерфейса взаимодействия с внешним окружением ИДМ используют протокол CAN-bus. Их связь с центральным компьютером может осуществляться с применением специальных коммутаторов или, как в нашем случае, – посредством общей шины (см. рисунок 4.2).

В комплектацию компьютера NISE-3500-i5520M не входит сетевая карта CAN-bus, однако он оснащен слотом расширения PCI, что делает возможным установку встраиваемой сетевой карты. В качестве сетевой карты выбрана модель CAN-bus-PCI производства компании «Марафон». К основным преимуществам такого решения относятся:

- совместимость со спецификацией PCI 2.1;
- два CAN-контроллера Philips SJA1000, соответствующие спецификации CAN 2.0 A/B;
- быстрый и эффективный доступ к CAN-контроллерам благодаря отображению внутренних регистров CAN-контроллеров в области памяти центрального процессора;
- CAN-bus интерфейс (в соответствии с CiA DS-102) с гальванической развязкой и защитой от перенапряжений и импульсных помех;
- потребляемый ток – не более 500 мА, средний – 350мА;
- диапазон рабочих температур: 0...+70 С.

Таблица 4.1 – Основные характеристики центрального компьютера «NISE-3500-i5520M»

Тип процессора	Intel Core i5 M
Тактовая частота процессора, ГГц	2,4
Системный чип	Intel QM57
Оперативная память	4 Гб, DDR3
Количество портов Gigabit Ethernet	2
Количество последовательных портов RS-232	3
Количество последовательных портов RS-422/485	1
Количество портов USB 2.0	6
Количество слотов расширения PCI	1
Интерфейс подключения монитора	VGA, DVI
Интерфейс подключения клавиатуры и мыши (дигитайзера)	USB
Аудио входы и выходы	присутствуют
Интерфейс подключения жесткого диска	SATA 2
Возможность установки SSD диска	присутствует
Материал корпуса	металл
Способ охлаждения	пассивный
Электропитание	сеть постоянного тока
Напряжение питания, В	9...30

Для повышения отказоустойчивости решено продублировать критически важные системы, к одной из таких систем относится система хранения данных. Объединение жестких дисков центрального компьютера в зеркальный RAID-массив значительно повышает надежность системы, однако выход компьютера из строя – вполне возможный сценарий развития событий при возникновении аварийной ситуации на экскаваторе. Поэтому, с целью повышения надежности хранения данных, совместно с центральным компьютером работает независимый самописец с автономным питанием. В качестве самописца выбрана модель CANlogger производства компании RM Michaelides. Самописец обладает следующими основными характеристиками:

- интерфейс CAN 2.0B, с гальванической изоляцией;
- максимальная скорость обмена данными по CAN-шине – 1 Мбит/с;

- количество каналов данных – 8;
- встроенные часы реального времени с автономным питанием;
- интерфейс подключения к компьютеру – USB 2.0;
- тип поддерживаемых карт памяти – Secure Digital до 2 Гб;
- класс защиты корпуса – IP65.
- диапазон рабочих температур $-20...+70^{\circ}\text{C}$;
- питание от сети постоянного тока 10...30В.

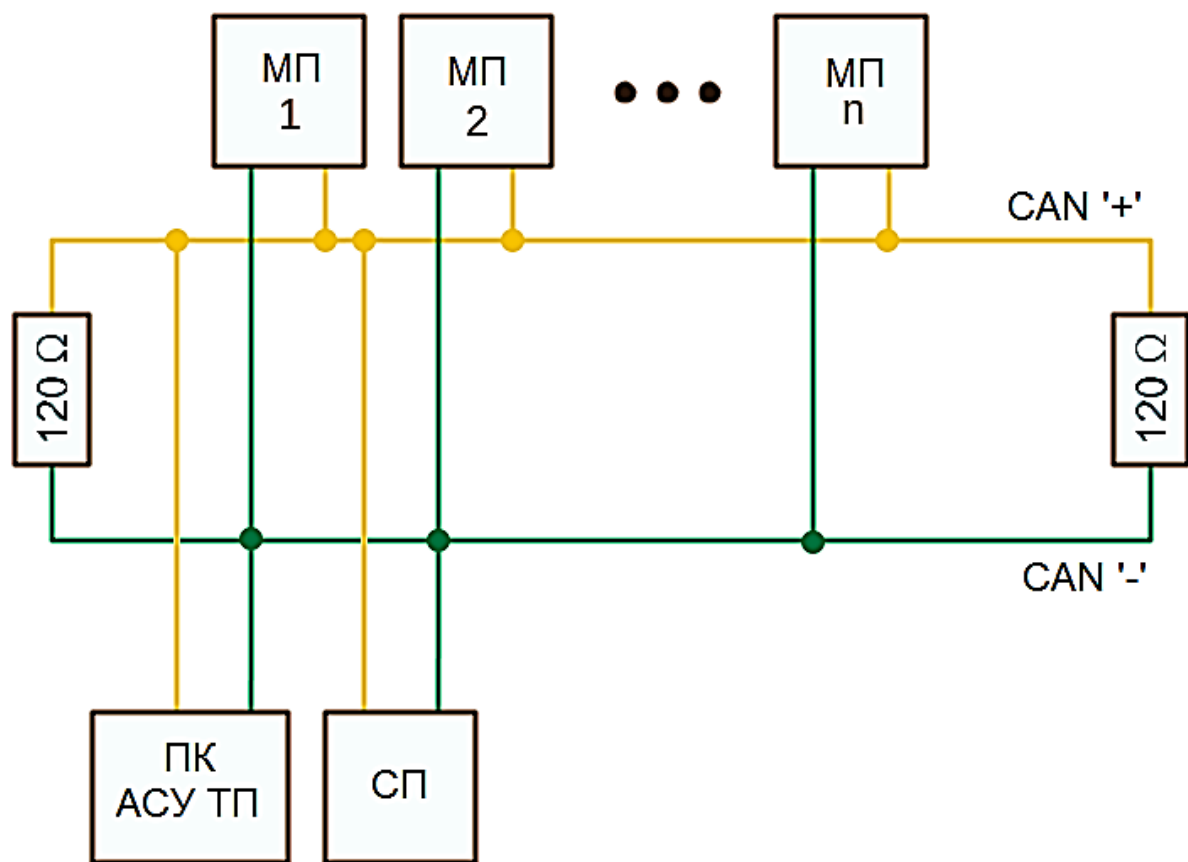


Рисунок 4.2 – Аппаратная организация общей шины CAN-bus, МП 1...n – микропроцессорный модуль «умного» датчика, ПК АСУ ТП – центральный компьютер уровня АСУ ТП, СП – самописец

В самописец устанавливается flash-карта стандарта Secure Digital объемом 2 Гб. Этого объема достаточно для непрерывной записи потока данных со всех

информационно - диагностических модулей мехатронного комплекса экскаватора в течение двух месяцев.

Для интеграции выбранного аппаратного обеспечения в существующей информационной системе мехатронного комплекса экскаватора предложено организовать локальную вычислительную сеть. Учитывая, что сетевое взаимодействие компьютеров осуществляется по протоколу Ethernet [85, 86], в качестве узлового устройства предлагается использовать неуправляемый коммутатор Korenix JetNet 3810Gf, обладающий следующими характеристиками:

- PoE (электропитание по кабелю Ethernet);
- энергопотребление не более 65 Вт;
- количество портов Gigabit Ethernet – 2;
- количество портов Fast Ethernet – 8.

Для связи экскаватора с АСУП возможно применение оборудования Wi-Fi, однако помимо промышленного исполнения, к этому оборудованию предъявляются высокие требования по дальности действия сети. Требуется организовать сеть, в которой максимальное удаление между беспроводной точкой доступа и клиентом может достигать 2-5 км. Для таких целей требуется применять специальные антенны и усилители. В качестве Wi-Fi моста была выбрана связка из всенаправленной антенны Ubiquiti AirMax Omni 5G 13dBi и беспроводной точки доступа Ubiquiti Rocket M5. Такое решение обладает следующими характеристиками:

- протокол передачи данных – 802.11a/n 5 GHz;
- максимальная скорость передачи данных – 300 Мб/с;
- мощность передатчика – 500 мВт;
- коэффициент усиления антенны – 13 dBi;
- максимальное расстояние между точкой доступа и клиентом – 5 км.

С целью повышения отказоустойчивости системы было принято решение организовать доступ к сети Internet одновременно двумя способами.

Первый способ подразумевает использование спутникового оборудования, которое монтируется на специальной вышке, находящейся в карьере. В качестве альтернативы можно использовать радиопередающее оборудование, использующее принцип отражения сигнала от стратосферы. В случае неглубоких карьеров можно также использовать GSM, 3G, LTE или CDMA оборудование.

Второй способ подходит только для неглубоких карьеров и заключается в размещении GSM-модемов непосредственно на корпусе экскаватора. В качестве GSM-модема можно использовать оборудование компании MOXA, например модем OnCell G3150-T. Данный модем обладает следующими характеристиками:

- стандарт сотовой связи: GSM, GPRS, EDGE;
- скорость передачи данных: до 237 кбит/с;
- мощность передатчика: 2Вт;
- режимы работы: Serial-to-GPRS, Ethernet-to-GPRS, VPN, SMS-туннель;
- интерфейс SIM-карты: 1 слот для SIM-карты;
- интерфейс LAN: RJ45, 10/100 Мбит/с;
- последовательный интерфейс: RS-232/422/485;
- монтаж: DIN.

4.2. Разработка интеллектуального информационно - аналитического программного обеспечения для работы с архивными данными

Разработан пакет программного обеспечения, предназначенный для удаленного анализа работы мехатронного комплекса карьерного экскаватора. Данное программное обеспечение имеет две версии. Первая предназначена для работы с файлами самописца, а вторая – для работы с файлами ИДС «ПУЛЬСАР 7».

Для того, чтобы воспользоваться этим ПО, предлагается регулярно (например, каждую неделю или каждый раз, когда происходит аварийная ситуация неизвестного происхождения) копировать файлы самописца на

персональный компьютер с установленным на нем аналитическим ПО «CAN-Reader».

Разработанное программное обеспечение выполняет следующие функции:

- ввод данных из файлов самописца;
- отображение данных в графическом виде;
- генерацию отчетов о событиях, произошедших в системе за указанный интервал времени (например, за смену);
- визуализацию работы узлов экскаватора за указанный интервал времени;
- поиск причин неисправностей, возникших в указанный момент времени.

Подробно рассмотрим каждую из функций разработанного программного обеспечения. Интерфейс главного окна программы представлен на рисунке 4.3.

Ввод данных осуществляется посредством графического интерфейса пользователя, как показано на рисунке 4.4. Источником данных являются закодированные файлы самописца.

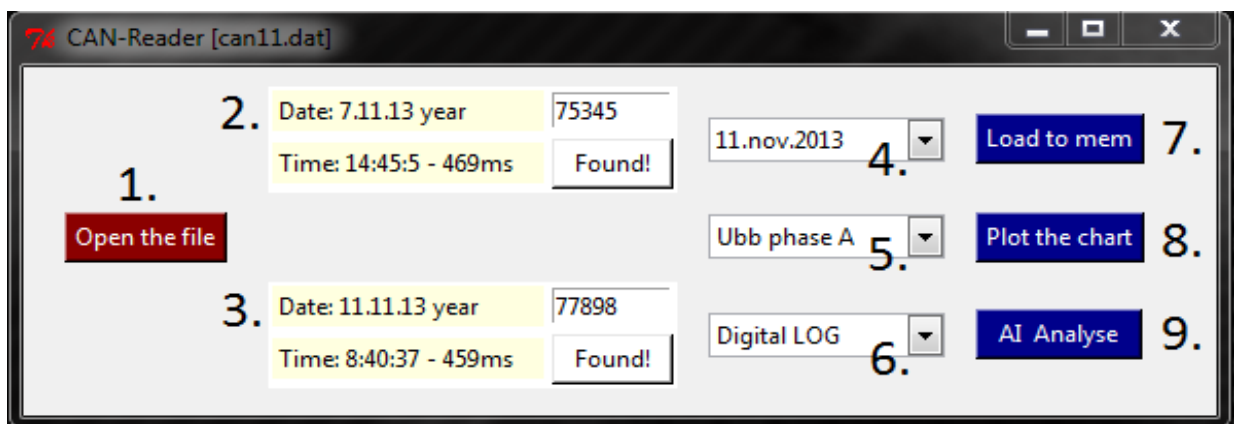


Рисунок 4.3 – Интерфейс ПО «CAN-Reader», 1 – кнопка открытия файла, 2,3 – формы выбора начальной и конечной точки исследуемого интервала времени, 4 – поле выбора даты, 5 – поле выбора параметра, характеризующего работу экскаватора, 6 – поле выбора диагностической функции, 7 – кнопка загрузки данных в память программы, 8 – кнопка построения графика, 9 – кнопка запуска интеллектуальной обработки

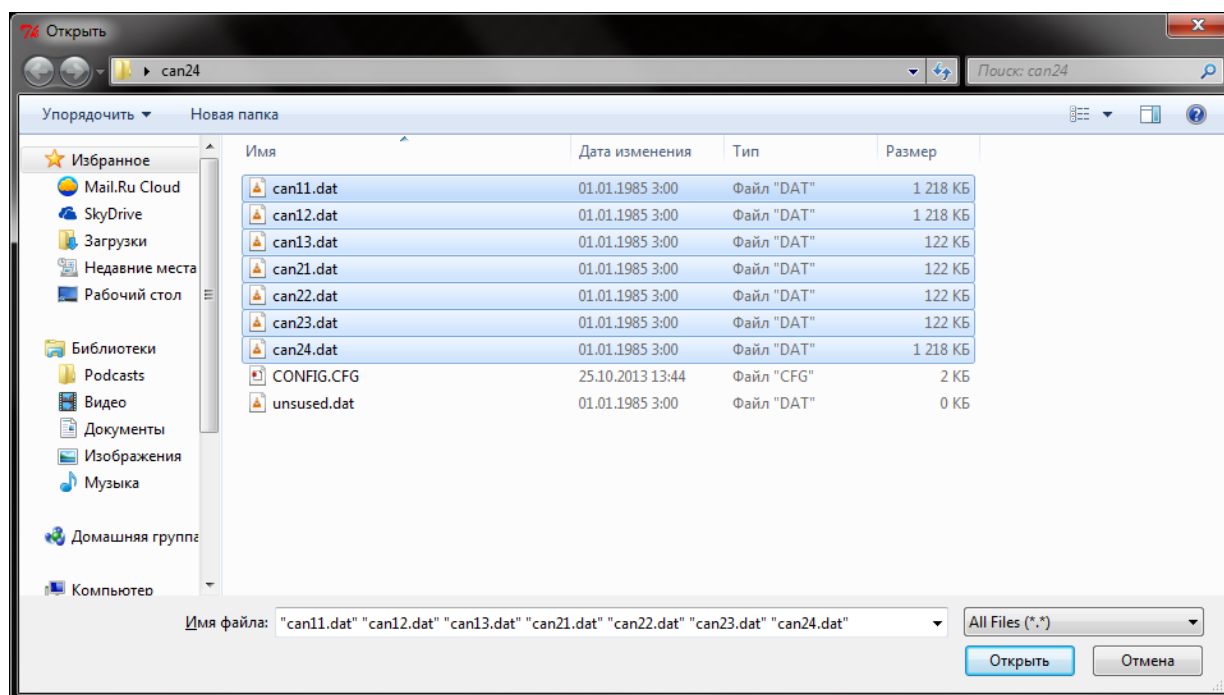


Рисунок 4.4 – Поле выбора файлов самописца

Реализован следующий алгоритм ввода данных и представления их в памяти программы:

- декодирование данных из файлов самописца;
- фильтрация данных с целью удаления «пустых ячеек», которые возникают в момент включения экскаватора;
- передискретизация данных с целью синхронизации всех потоков данных и перехода к одной базисной частоте дискретизации для упрощения дальнейшей работы;

Данные самописца можно отобразить в виде графиков, для этого нужно сначала загрузить их из файлов самописца в память программы одним из двух имеющихся способов: выбрав интересующий нас интервал времени из выпадающего списка или непосредственно указав начальную и конечную точки на оси времени. Далее необходимо указать программе интересующий нас параметр, характеризующий работу экскаватора, выбрав его из выпадающего списка, а затем отобразить графики посредством нажатия кнопки «Plot the chart» (рисунок 4.5). Кроме параметров, хранящихся в памяти самописца, программа

позволяет определять производные от этих величин, такие как активная, реактивная и полная мощность.

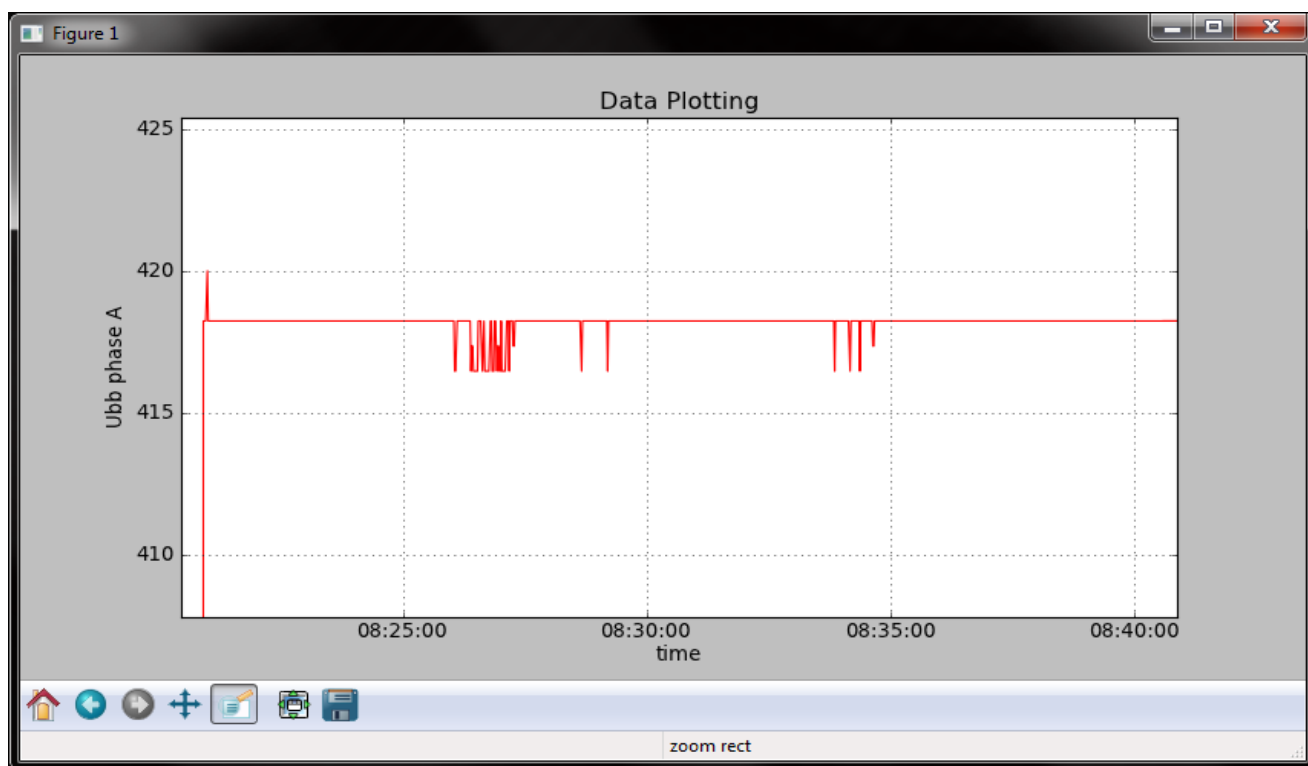


Рисунок 4.5 – Пример отображения данных в графическом виде

Генерация отчетов о событиях, произошедших в системе, как и большинство других функций программы, осуществляется с помощью модуля интеллектуальной обработки данных. Для того, чтобы воспользоваться этой функцией, требуется сначала загрузить в память программы данные за требуемый интервал времени, а затем выбрать функцию генерации отчета. Отчет представляет собой html-документ, включающий в себя:

- порядковый номер события;
- дату и время события;
- подсистему (модуль), инициировавшую событие;
- расшифровку события (краткий отчет).

ИДС карьерного экскаватора способна инициировать четыре возможных события:

- переход подсистемы в нормальный режим (normal);
- переход подсистемы в режим перегрузки (overheat);
- потеря связи с подсистемой (error);
- потеря связи (drop).

На рисунке 4.6 представлен пример такого отчета.

ПО CAN-Reader обеспечивает визуализацию истощения ресурса компонентов мехатронного комплекса экскаватора (в частности – автоматических выключателей) и визуализацию параметров электропитающей линии.

packet #	date-time	module	event
1	11.11.13 - 8:28:45	11A2	Temperature in the machine hall = error Temperature outside the excavator = error
1	11.11.13 - 8:28:45	21A2	GCP - Bearing temperature 1 = error GCP - Bearing temperature 2 = error GCP - Temperature of excitation winding = error
1	11.11.13 - 8:28:45	22A2	GSP - Bearing temperature 1 = error GSP - Bearing temperature 2 = error GSP - The air temperature - Inlet = error GSP - The air temperature - Outlet = error
1	11.11.13 - 8:28:45	23A2	M1 - Bearing temperature 1 = error M1 - Bearing temperature 2 = error M1 - Winding temperatures 1 = error M1 - Winding temperatures 2 = error

Рисунок 4.6 – Пример отчета об изменении состояний подсистем ИЭ

При реализации функций программного обеспечения, связанных с оценкой ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, вставал

вопрос выбора программной системы анализа надежности. Существует класс специализированных программных систем, предназначенных для выполнения этой задачи, основными представителями которого являются: АРБИТР, АСОНИКА-К, АНАРЭС, BlockSim, Risk Spectrum, Weibull++ и др. В настоящей работе выбор сделан в пользу более универсального решения – интерпретатора Python 2.7 с комплектом математических библиотек `simpy`, на основе которого реализованные все остальные функции ПО CAN-Reader.

Визуализация остаточного ресурса АВ осуществляется в графической форме с указанием графика остаточного ресурса выбранного АВ и расчетного значения оставшегося до замены времени работы (рисунок 4.7).

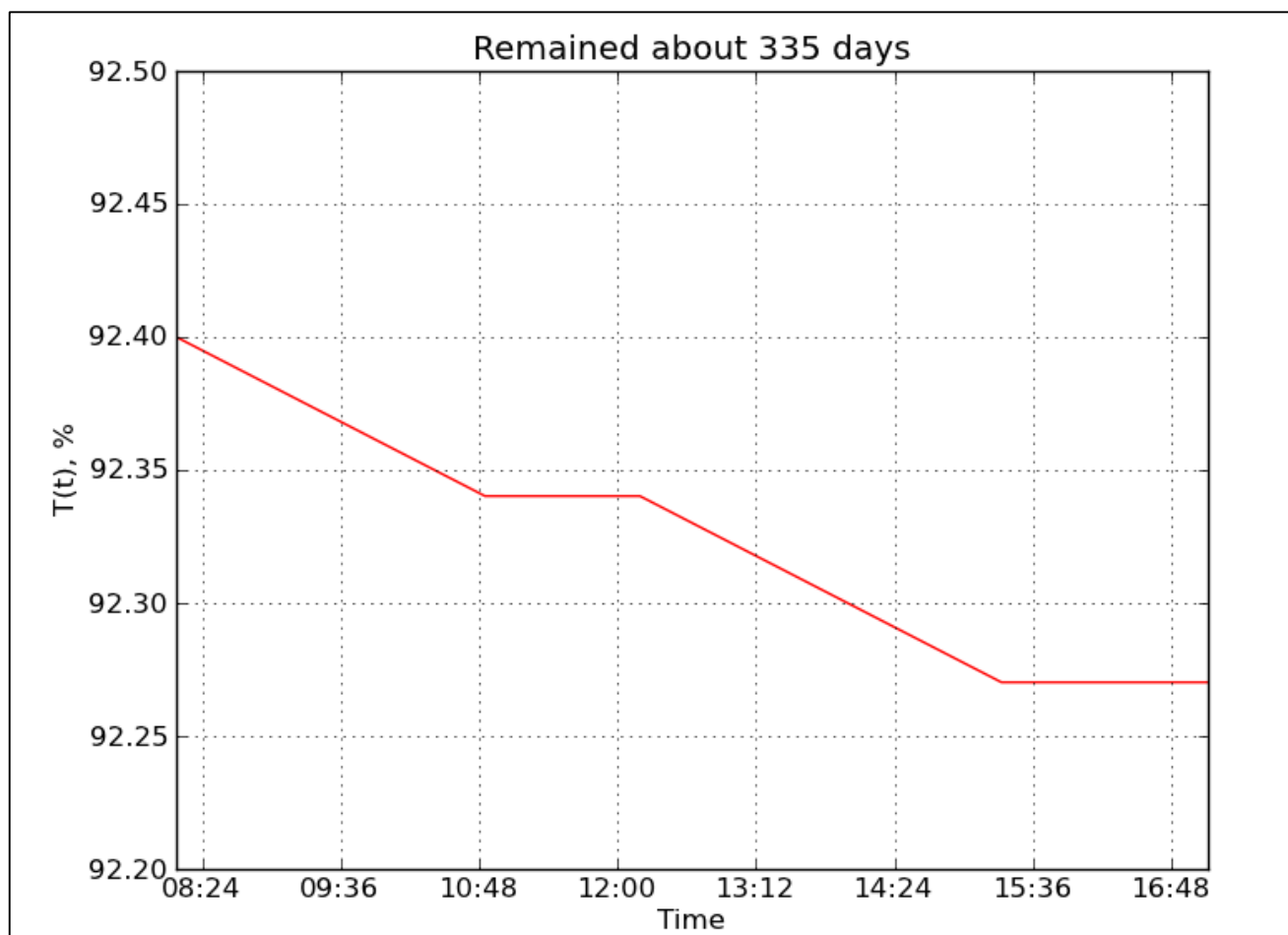


Рисунок 4.7 – Визуализация остаточного ресурса АВ

При визуализации параметров линии электропередачи строятся временные диаграммы токов, напряжения и мощности. Дополнительно производится

определение ЭДС, активного и реактивного сопротивлений линии, питающей экскаватор. На графиках красным цветом обозначается выход параметров за пределы диапазона нормальных значений. На рисунке 4.8 проиллюстрирована работа данной функции.

Разработанное ПО позволяет осуществлять поиск причин неисправностей, возникших в определенный момент времени. Для этого требуется указать программе момент времени, в который были замечены неполадки, выбрать одну из диагностических функций и запустить поиск неисправностей. Поиск неисправностей осуществляется в несколько этапов:

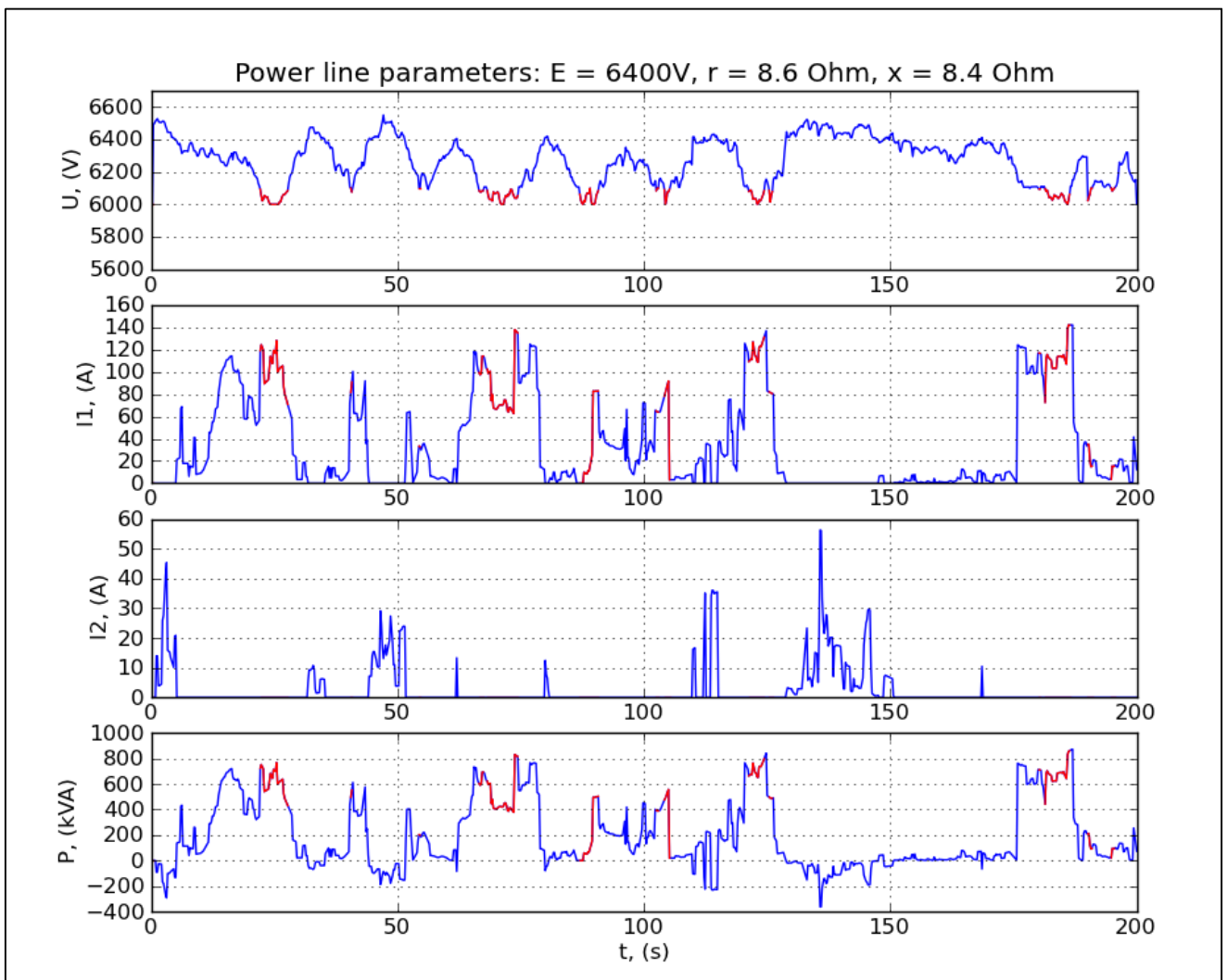


Рисунок 4.8 – Визуализация параметров ЭЛ, U – напряжение бортовой сети, I_1 – ток потребления, I_2 – ток рекуперации, P – полная мощность

- пользователь выбирает одну из подсистем, которую будет исследовать программа, это может быть линия электропитания, АВ, электроприводы главного движения или силовые трансформаторы;
- программа определяет параметры подсистемы, значения которых выходят за пределы допустимых значений;
- с помощью логических правил, основываясь на значениях, полученных на предыдущем этапе, производится локализация проблемы и выявление ее причин;
- производится генерация отчета, содержащего причины неполадок с указанием логической цепочки, приведшей систему к таким выводам (см. рисунок 3.15).

Имеется альтернативная возможность проведения диагностики экскаватора. Для этих целей используется нейронная сеть, хранящаяся в отдельном файле. При таком подходе производится комплексный анализ работы экскаватора за указанный интервал времени, при этом окончательный отчет формируется с помощью логических правил на основании работы нейронной сети.

Испытания программного обеспечения «*CAN-Reader*» проводилось на наборах тестовых данных, полученных с экскаватора ЭКГ-18Р.

4.3. Разработка программного обеспечения оперативного информирования персонала

Оперативное информирование персонала горного предприятия можно осуществлять различными способами, однако наиболее эффективным является рассылка SMS-сообщений. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить информирование обслуживающего персонала и технических специалистов посредством SMS-сообщений. Для рассылки сообщений программное обеспечение, написанное на языке Python, использует облачный сервис компании Twilio.

Структурная схема системы приведена на рисунке 4.9

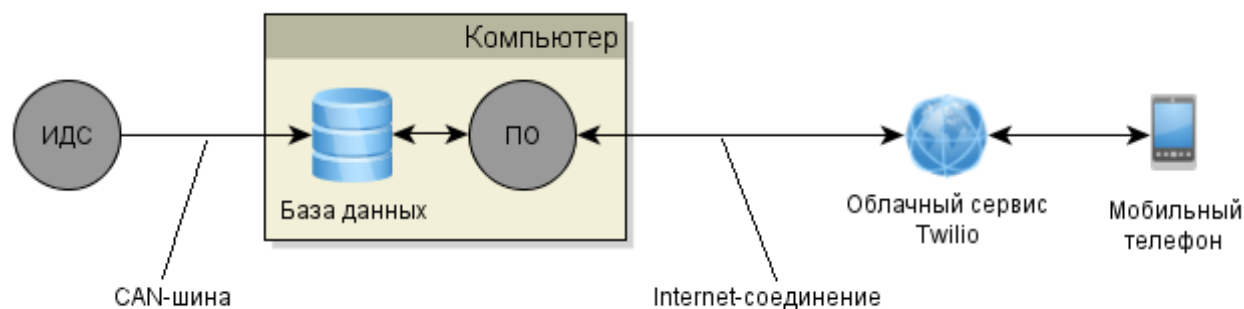


Рисунок 4.9 – Структурная схема системы оперативного информирования персонала карьера посредством SMS-сообщений

Программное обеспечение работает следующим образом:

Система считывает оперативные данные о работе экскаватора из базы данных ИДС. К таким данным относятся:

- таблицы аварийных отключений каждой из подсистем экскаватора;
- данные с ЯВВ (токи, напряжения и $\cos(\varphi)$).

Работа с базой данных осуществляется посредством модуля sqlite3. Ниже приводится листинг функции считывания и предобработки данных из БД ИДС. Данная функция вначале осуществляет поиск аварийных ситуаций за период рабочей смены, а затем – считывание данных, которые необходимы для анализа состояния ЭЛ, питающей экскаватор, во время возникновения этих ситуаций. Благодаря специальным SQL-запросам, вся предварительная обработка данных осуществляется на стороне БД. Ниже приводится листинг данной функции, перед которым дополнительно включено описание основных глобальных переменных программы:

```
error_log = [] # time of errors
hv_cell   = [] # HV-cell parameters during error time
hv_res    = [] # HV-cell wire resistance and EMF
level     = [] # level of error (normal, error or drop)
is_sended = 0  # today we do not send the messages

def readData(): # read function
```

```

con = lite.connect('ids.db')
with con:
    cur = con.cursor()
    cur.execute("SELECT time FROM events WHERE arg={0}".format(ERROR))
    rows = cur.fetchall()
    for i in range(len(rows)):
        error_log.extend([rows[i][0]])
    for i in range(len(error_log)):
        mi = error_log[i] - delta
        ma = error_log[i]

    cur.execute(''SELECT max(i1), max(i2), avg(fi)
                  FROM cell WHERE time>={0} AND\
time<={1}'''.format(mi,ma))
    rows = cur.fetchall()
    (i1,i2,cfi) = (rows[0][0], rows[0][1], rows[0][2])

    cur.execute("SELECT avg(u) FROM cell WHERE i1={0}".format(i1))
    rows = cur.fetchall()
    u1 = rows[0][0]
    cur.execute("SELECT avg(u) FROM cell WHERE i2={0}".format(i2))
    rows = cur.fetchall()
    u2 = rows[0][0]

    cur.execute("SELECT avg(u) FROM cell WHERE i1<10 AND i2<10")
    rows = cur.fetchall()
    E = rows[0][0]
    hv_cell.extend([[E,u1,u2,i1,i2,cfi]])

```

После получения необходимых данных, осуществляется их математическая обработка с целью вычисления активного, реактивного и полного сопротивлений линии. Расчет данных показателей осуществляется по описанному в третьей главе алгоритму с применением модуля `sympy` (`sp`). Данный модуль позволяет решать системы уравнений численным методом.

```

def dataProcessing():
    for i in range(len(error_log)):
        (E,U1,U2) = (hv_cell[i][0], hv_cell[i][1], hv_cell[i][2])
        (I1,I2,cfi) = (hv_cell[i][3], hv_cell[i][4], hv_cell[i][5])
        sfi = (1 - cfi**2)**0.5
        (Ia1,Ia2,Ip1,Ip2) = (cfi*I1,cfi*I2,sfi*I1,sfi*I2)
        (x,r) = (sp.Symbol('x'),sp.Symbol('r'))

        a = [(U1+Ia1*r+Ip1*x)**2 + (Ia1*x-Ip1*r)**2 - E**2,
              (U2-Ia2*r-Ip2*x)**2 + (Ia2*x-Ip2*r)**2 - E**2]
        b = [r, x]
        c = [10.0, 10.0]
        sol = sp.nsolve(a,b,c)
        (r, x, z) = (sol[0], sol[1], (sol[0]**2+sol[1]**2)**0.5)
        hv_res.extend([[E,float(r),float(x),float(z)]])

```

Следующим этапом является формирование предупредительных сообщений, для этих целей используется набор логических правил. Приведем пример подобного правила: если хотя бы один из показателей качества электроэнергии выходит за пределы интервала нормальных значений, то формируется предупредительное сообщение (error). Если же, хотя бы один из этих параметров выходит за пределы интервала допустимых значений, то формируется сообщение об аварии (drop).

```

def logicRules():
    for i in range(len(error_log)):
        res = NORMAL
        if hv_res[i][0] < 6000 and hv_res[i][0] > 5000:
            res = ERROR
        if hv_res[i][1] > 1.0 and hv_res[i][1] < 2.0:
            res = ERROR
        if hv_res[i][0] < 5000 or hv_res[i][1] > 2.0:

```

```

    res = DROP
    level.extend([res])

```

Заключительным этапом работы программы является отправка предупредительных и аварийных сообщений.

В течение смены может быть отправлено только одно предупредительное и одно аварийное сообщение, однако, после устранения возникших в ходе работы экскаватора неисправностей, специалисты могут перезапустить программу, тем самым давая ей возможность, в случае возникновения новых неисправностей, вновь разослать информационные сообщения.

```

def sendMessages():
    global is_sended
    (last_num, for_sending) = (0, NORMAL)
    for i in range(len(error_log)):
        if level[i] == ERROR and (for_sending != DROP):
            for_sending = ERROR
            last_num = i
        if level[i] == DROP:
            for_sending = DROP
            last_num = i

    if for_sending >= ERROR and is_sended < for_sending:
        is_sended = for_sending
        n = len(error_log) - 1
        (E,r,x) = (hv_res[n][0],hv_res[n][1],hv_res[n][2])
        date = num2date(error_log[n]).date()
        m1 = 'The problem with line was detected in'
        message = m1 + '{0}, '.format(date) + \
'E = {0:.0f}V, r={1:.2f} Ohm, x={2:.2f} Ohm'.format(E,r,x)
        client = TwilioRestClient(ACCOUNT_SID, AUTH_TOKEN)
        if for_sending == ERROR:
            for phone in staff_numbers:

```

```

client.messages.create(to=phone,\
from_=shovel_phone, body=message,)
print 'ERROR messages were sent'
if for_sending == DROP:
    for phone in all_numbers:
        client.messages.create(to=phone,\
from_=shovel_phone, body=message,)
        print 'DROP messages were sent'

```

Пример SMS-сообщения, полученного от экскаватора с помощью разработанного программного обеспечения, приведен на рисунке 4.10

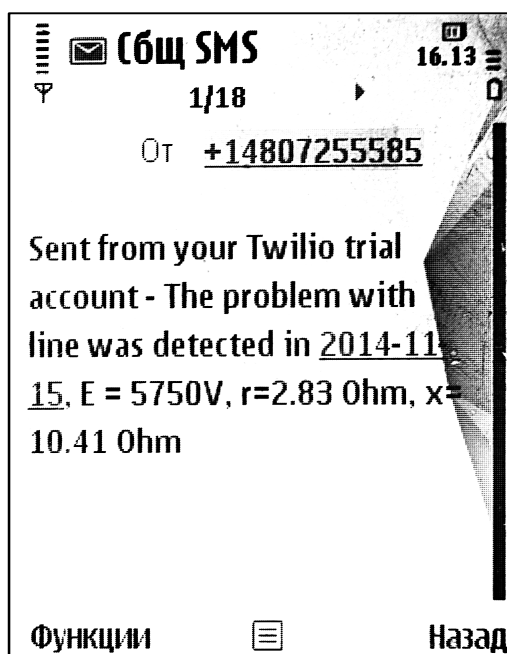


Рисунок 4.10 – Пример информационного SMS-сообщения, полученного от экскаватора

4.4. Разработка информационно - аналитического ПО для работы с ИДС «Пульсар-7»

Разработанное программное обеспечение «*DAT-Reader*» является разновидностью ПО «*CAN-Reader*», адаптированного для работы параллельно с информационно - диагностическим ПО «ПУЛЬСАР 7».

ПО «*DAT-Reader*» имеет две версии: первая, как и «*CAN-Reader*», рассчитана на профессиональных пользователей (рисунок 4.11), а вторая – имеет всего одну кнопку и предназначена для оперативного анализа линии электропередачи, питающей экскаватор (рисунок 4.12), листинг этой программы приведен в приложении 4.

Первая версия ПО имеет три функции: ввода, отображения и анализа данных. Первые две функции схожи с таковыми у «*CAN-Reader*», Главное отличие состоит в отсутствии операции передискретизации, т.к. все данные по умолчанию записываются синхронно.

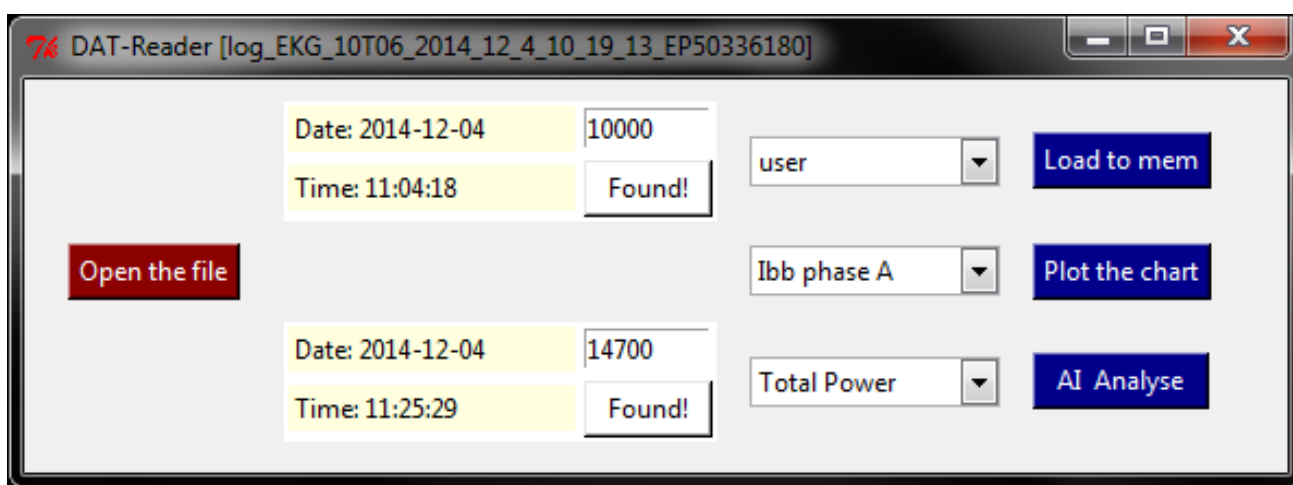


Рисунок 4.11 – Интерфейс программы *DAT-Reader*

Более подробно следует рассмотреть интеллектуальные возможности этой программы, к которым относятся:

1. расчет средней полной, активной и реактивной мощности;
2. идентификация параметров электропитающей линии;
3. визуализация работы компонентов мехатронного комплекса;
4. определение количества циклов экскавации и количества загруженных экскаваторов с указанием времени погрузки;
5. отчет об эффективности работы экскаватора;
6. автоматический анализ работы машины с функцией отправки SMS.

Первые две функции создают всплывающее окно, информирующее пользователя о соответствующих показателях работы машины: о мощности (P , Q и S), сопротивлении (r , x , z) и ЭДС (E) линии электропередачи.

Третья функция предназначена для построения графика неполадок по следующему принципу: если система работает нормально, функция принимает нулевое значение, если обнаружено превышение напряжения на ЯВВ, функция принимает значение 1.0, если же обнаружено падение напряжения на ЯВВ ниже предельно допустимого, функция принимает значение -1.0. На рисунке 4.13 представлен пример подобного отчета (с указанием качественных показателей линии электропередачи). В данном примере экскаватор работает нормально.

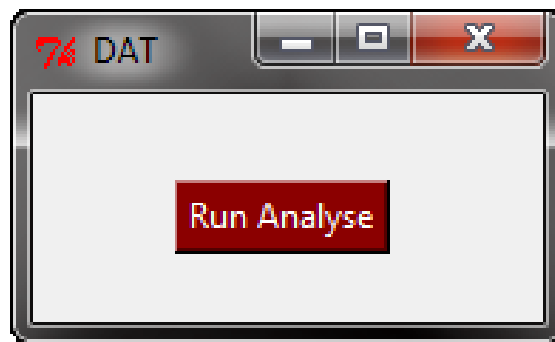


Рисунок 4.12 – Интерфейс сокращенной версии программы DAT-Reader

Четвертая функция – определение количества циклов экскавации – производится с применением специализированного интеллектуального алгоритма. Пример работы данного алгоритма представлен на рисунке 4.14. Его особенностью является возможность работы с экскаваторами различных моделей, в том числе ЭКГ-10Т, ЭКГ-15Т и ЭКГ-20К, для каждого из которых используются собственные наборы параметров.

Пятая функция – отчет об эффективности работы экскаватора [126] – формируется в формате html. Для генерации данного отчета используются те же данные, что и для предыдущей функции, которые в свою очередь подвергаются математической обработке и представлены в понятной для пользователя форме – в виде таблицы. Пример отчета приводится на рисунке 4.15.

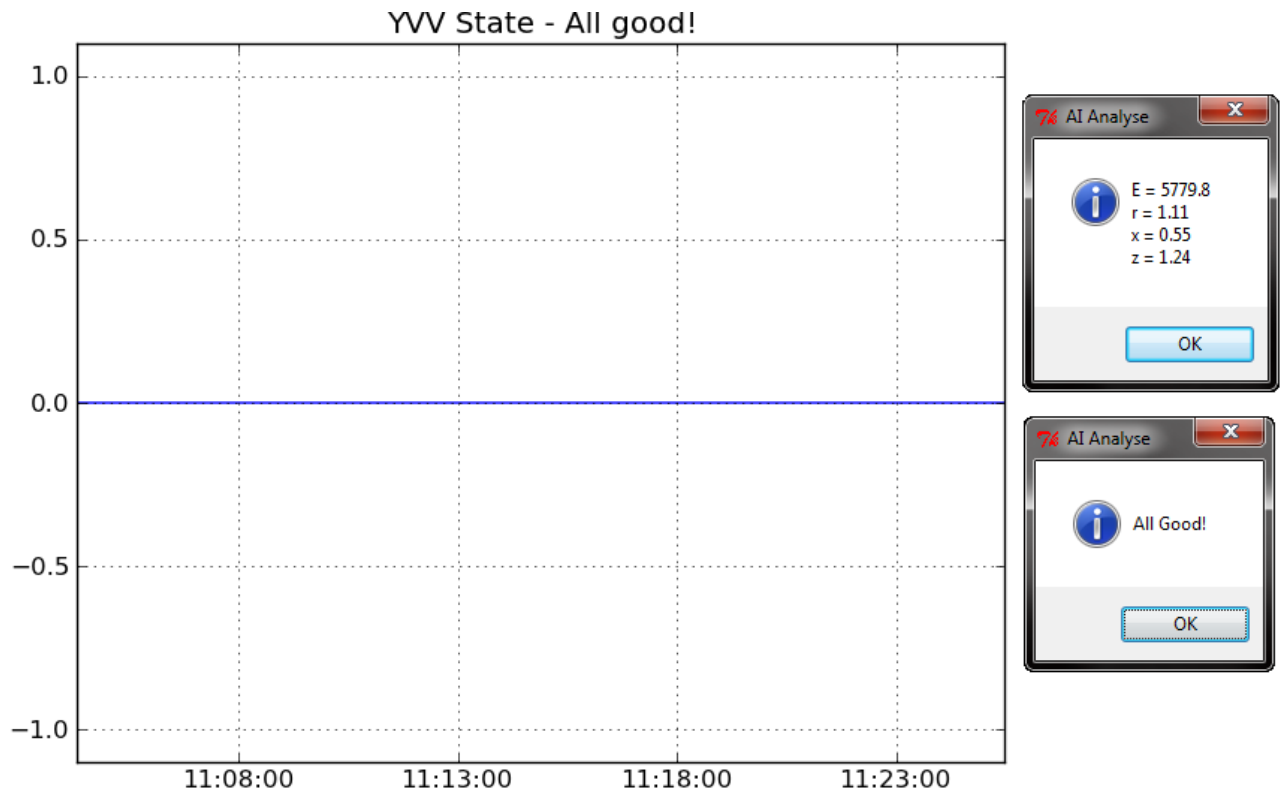


Рисунок 4.13 – Пример графика неполадок экскаватора с указанием качественных показателей электропитающей линии

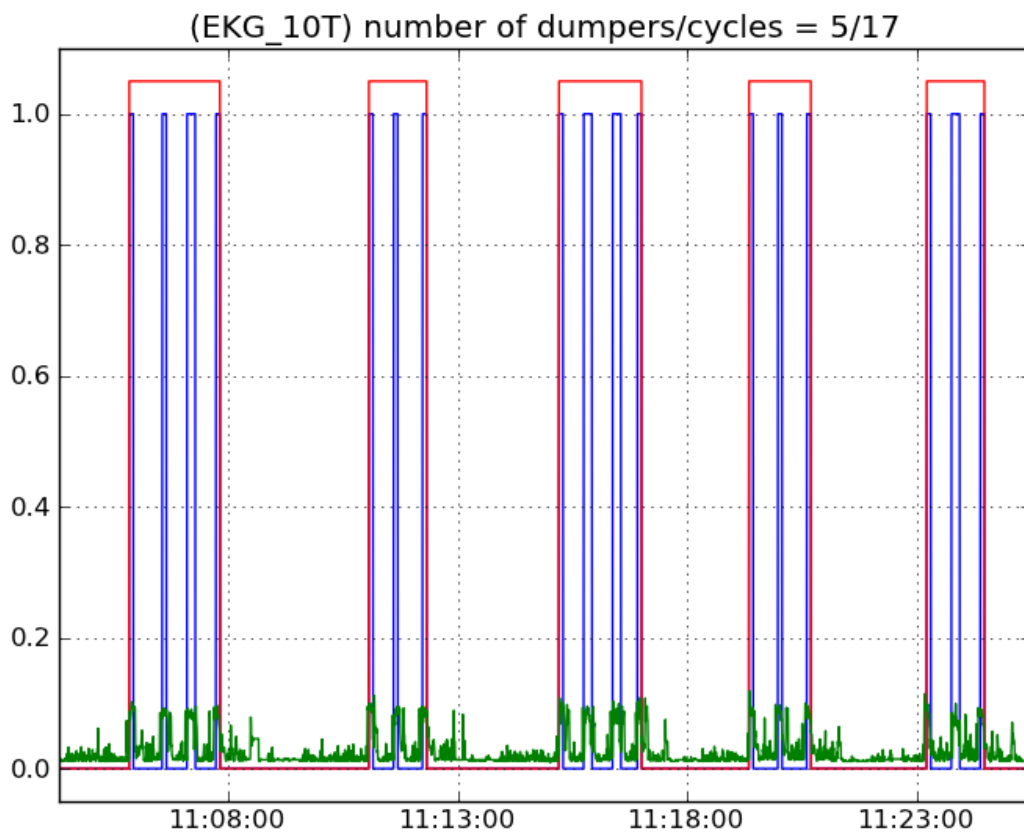


Рисунок 4.14 – График экскавации экскаватора ЭКГ-10Т. Зеленым обозначен фазный ток ЯВВ в масштабе 1:1000, синим – циклы экскавации, красным – циклы загрузки самосвалов

Шестая функция – автоматический анализ работы машины – может осуществляться двумя способами: с помощью основной программы (рисунок 4.11), либо автоматически с помощью сокращенной версии программы (рисунок 4.12). Программа осуществляет поиск ошибок в отчете ИДС и анализирует параметры линии за несколько секунд до возникновения неполадок. После расчета параметров электропитающей линии с помощью набора логических правил, программа проверяет допустимость режима работы линии и, в случае выявления неполадок, производит информирование об этом оператора. Дополнительно, в случае необходимости, программа может отправить предупредительные SMS-сообщения специалистам карьера по аналогии с теми, что рассылаются программой, как было описано в предыдущем разделе настоящей работы.

#	Parameter	Value	Unit
1	Общее время работы экскаватора	21.0	мин
2	Общее время погрузки	8.0	мин
3	Общее время простоя	13.0	мин
4	Процент времени погрузки	36.17	%
5	Процент времени простоя	63.83	%
6	Общее энергопотребление	55.77	кВт*ч
7	Энергия при погрузке	31.37	кВт*ч
8	Энергия при простое	24.4	кВт*ч
9	Средняя мощность	158.22	кВт
10	Средняя мощность при погрузке	246.03	кВт
11	Средняя мощность при простое	108.48	кВт
12	Общее количество загруженных самосвалов	5	шт
13	Энергия затрачиваемая на погрузку одного самосвала	6.27	кВт*ч
14	Время погрузки одного самосвала	1.53	мин
15	Энергоемкость экскавации (полная)	0.39	кВт*ч/м ³
16	Энергоемкость экскавации (при работе)	0.21	кВт*ч/м ³

Рисунок 4.15 – Отчет об эффективности работы экскаватора ЭКГ-10Т

Описанное в настоящем разделе программное обеспечение опробовано и внедрено в работу на новых экскаваторах ЭКГ-10Т, ЭКГ-15Т и ЭКГ-20К в комплексе с информационно - диагностической системой «ПУЛЬСАР 7» производства ООО «Компания Объединенная Энергия», г. Москва. Акт о внедрении приведен в приложении 2.

4.5. Выводы

1. Разработана структура аппаратной платформы информационной системы экскаватора, включающая в себя три составляющие: локальные ИДМ, центральный вычислительный комплекс экскаватора, в основе которого лежит мощный промышленный компьютер, и диспетчерский центр. Связь между локальными вычислительными устройствами и центральным компьютером (АСУ ТП) осуществляется по CAN-шине, связь между АСУ ТП и АСУП (диспетчерским центром) – по беспроводному каналу Wi-Fi, а связь с глобальной сетью Internet обеспечивается посредством спутникового или GSM-соединения.

2. Методы контроля и диагностики экскаватора реализованы в виде комплекса программного обеспечения, состоящего из четырех программ.

Первая программа представляет собой «оболочку» и осуществляет ввод и вывод данных из файлов самописца, а также набор подключаемых модулей, каждый из которых реализует собственную методику обработки и предоставления данных, в том числе расчет параметров линии электропередачи, формирование отчетов об аварийных отключениях и др.

Вторая программа реализует функцию оперативного информирования обслуживающего персонала в реальном времени, с этой целью программа анализирует состояние экскаватора и, в случае возникновения неполадок, осуществляет рассылку информационных SMS-сообщений на заранее указанные номера сотовых телефонов.

Третья программа работает по аналогии с первой, однако, в качестве исходных данных использует файлы информационно - диагностической системы «ПУЛЬСАР 7» и реализует ряд дополнительных возможностей, в частности, генерацию отчета об эффективности работы экскаватора.

Четвертая программа имеет упрощенный интерфейс по сравнению с предыдущими и выполняет функцию поиска причин аварийных отключений.

3. Сформулированы требования к аппаратным блокам информационной системы карьерного экскаватора и выбрано необходимое оборудование, в частности, промышленный компьютер NISE-3500-i5520M, используемый в качестве центрального компьютера уровня АСУ ТП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования и компьютерное моделирование, выполненные в настоящей работе, позволили получить следующие результаты:

1. Разработаны и реализованы в среде Matlab/Simulink модели компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора, ориентированные на решение задач интеллектуального управления, контроля и диагностики.

Модели электроприводов главного движения (подъем, напор, поворот и ход) включают математическое описание двигателей и механических нагрузок.

Модели надежности и ресурса компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора основаны на анализе физических процессов изнашивания.

Адекватность моделей компонентов мехатронного комплекса экскаватора подтверждается соответствием результатов компьютерного моделирования и реальных показателей, полученных в ходе эксплуатации карьерных экскаваторов. Данные проведенных исследований получены совместно с ООО «Компания Объединенная Энергия».

2. Разработана и исследована структура интеллектуальной информационно - управляющей системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора, построенная по принципу децентрализованной вычислительной сети, включающей в себя систему управления электроприводами главного движения, центральный сервер ИС, телекоммуникационное оборудование, и локальные информационно - диагностические модули, устанавливаемые на основных компонентах мехатронного комплекса экскаватора, выполняющие функции сбора, хранения, интеллектуального анализа и информационного взаимодействия с другими компонентами системы.

3. Разработан программно-аппаратный комплекс системы «Электронный машинист», выполняющий функции сбора, хранения, анализа и представления данных, предварительно обработанных в ИДМ и предназначенный для постоянного мониторинга работы экскаватора и его отдельных компонентов и

формирования объективных данных обо всех системах экскаватора (включая машиниста), окружающей среде и системе электропитания.

4. Разработана и исследована структура телекоммуникационной системы «Виртуальный экскаватор», объединяющая в ЕИП машины и персонал горного и проектного предприятий, обеспечивающая их информационное взаимодействие посредством локальной вычислительной сети, сети Internet и телефонной связи с целью непрерывной информационной поддержки жизненного цикла экскаваторов и проектирования новых машин на основе изучения данных о работе машин текущего поколения.

5. Разработан новый способ идентификации параметров электропитающей системы мехатронного комплекса экскаватора, обеспечивающий непрерывный контроль параметров системы по результатам измерения токов и напряжений на вводе экскаватора. Погрешность измерения активного и реактивного сопротивлений ЭЛ указанным способом лежит в диапазоне от 0,1 до 0,4 Ом, при использовании измерительных трансформаторов тока и напряжения класса точности 0,2.

6. Разработаны новые способы контроля и определения ресурса ЩКУ электрической машины, ресурса автоматических выключателей и ресурса изоляции силовых трансформаторов, предназначенные для автоматизированного анализа соответствующих компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора.

7. Разработан пакет программного обеспечения контроля и диагностики основных компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора: электроприводов главного движения, автоматических выключателей и силовых трансформаторов. Данный пакет позволяет определять основные показатели и давать оценку работы компонентов мехатронного комплекса экскаватора.

8. Предложенная в работе методика интеллектуальной диагностики компонентов мехатронного комплекса карьерного экскаватора и методика контроля параметров электропитающей системы мехатронного комплекса экскаватора использованы в инновационной деятельности ООО «Компания

Объединенная Энергия», а именно при выполнении договора № JP-13-110 от 05.09.2013, состоящего в разработке и реализации мехатронного комплекса карьерного экскаватора нового поколения ЭКГ-10М. Эффективность использования научных результатов и практических рекомендаций определяется повышением технического уровня карьерных экскаваторов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВ – автоматический выключатель

АД – асинхронный двигатель

АСУ – автоматизированная система управления

АСУП – автоматизированная система управления предприятием

БД – база данных

Г-Д – генератор-двигатель

ДПТ – двигатель постоянного тока

ЕИП – единое информационное пространство

ИАСУ – интеллектуальная автоматизированная система управления

ИВ – интернет вещей

ИДМ – информационно - диагностический модуль

ИДС – информационно - диагностическая система

ИИ – искусственный интеллект

ИнС – интеллектуальная система

ИОД – интеллектуальная обработка данных

ИС – информационная система

МП – микропроцессор

ПК – персональный компьютер

ПО – программное обеспечение

СУ – система управления

ТП – технологический процесс

ТрП-Д – транзисторный преобразователь-двигатель

ЩКУ – щеточно-коллекторный узел

ЭКГ – экскаватор карьерный гусеничный

ЭЛ – электропитающая линия

ЭШ – экскаватор шагающий

ЯВВ – ячейка высоковольтного ввода

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабокин Г.И. Васильев Н.Н. Математическое моделирование в электромеханической системе очистного комбайна // Горный информационно - аналитический бюллетень, 2009, №12 – с. 168 – 178.
2. Вуль Ю.Я., Ключев В.И., Седаков Л.В. Наладка электроприводов экскаваторов. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Недра. 1975. – 312 с.
3. Ефременков А.Б. Горные машины и оборудование. Введение в специальность. Часть I: учебное пособие / А.Б. Ефременко, А.А. Казанцев, М.Ю. Блащук. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 152 с.
4. Завьялов В.М., Семькина И.Ю. Математическая модель механической части взаимосвязанных электроприводов напора и подъема карьерного экскаватора / Известия Томского политехнического университета. 2007, т. 310, №3. – С. 40 – 43.
5. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода экскаваторов. – М., Энергия, 1971. – 320 с.
6. 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.
7. Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров. М.: Недра, 1980. – 317 с.
8. 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.
9. Мариев, П.А. 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.

10. Микитченко А.Я, Шевченко А.Н., Шоленков А.Н. Щербаков А.В., Шоков М.А. Тиристорный электропривод экскаватора ЭКГ-5 / Горное оборудование и электромеханика, 2009, № 4. С. 16 – 22.
11. Носырев М.Б., Карякин А.Л. Расчеты и моделирование САУ главных электроприводов одноковшовых экскаваторов. – Свердловск, Изд-во СГУ им. В.В. Вахрушева, 1987. – 88 с.
12. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 606 с., ил.
13. Серов Н.А., Калачиков П.Н., Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электротрансмиссии самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 136 т // Горное оборудование и электромеханика, 2005, №5. – С. 22 – 25.
14. Чулков Н.Н. Электрификация карьеров. – М., Недра, 1974. – 344 с.
15. C. Hendricks. Performance Monitoring of Electric Mining Shovels, Ph.D. thesis. - Monreal, McGill University. 1990. – 386 p.
16. Мэркс И. Юнгниц Г. Горная механика. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по угольной промышленности, 1957. – 757 с.
17. H. Wu. Modelling and Simulation of Electric Mining Shovels. Ph.D. thesis. - Monreal, McGill University, 1995. - 159 p.
18. Певзнер Л.Д. Алгоритмический и структурный синтез автоматизированного управления шагающим экскаватором драглайном // Докт. дисс. / МГИ, 1987.
19. Трубецкой К.Н., Кулешов А.А., Клебанов А.Ф., Владимиров Д.Я. Современные системы управления горно-транспортными комплексами. – СПб., Наука, 2007. – 306 с.
20. Ющенко А.С., Киселев Д.В. Ситуационное управление мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника, 2000. №5. С.10 – 15.

21. Гафурьянов Р.Г., Комиссаров А.П., Шестаков В.С. Моделирование рабочего процесса экскаваторов / Горное оборудование и электромеханика. 2009, № 6. – С. 40 – 45.
22. Козлов В.В. Надежность горных машин и оборудования: Учеб. пособие для вузов. – Алчевск: ДГМИ, 2002. – 277 с.
23. Курбатова О.А. Надежность горных машин: учеб. пособие / О.А. Курбатова, Л.С. Ксендзенко, Д.Н. Николайчук. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.
24. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. Учебник для вузов – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 400 с.
25. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника, 2000, №1. – С. 5-10.
26. Илюхин Ю.В., Татаринцева А.В. Математическая модель и особенности управления мобильным роботом с мехатронным гибридным приводом // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012, №2. – С. 222-227.
27. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учебник – СПб.: Корона-Век, 2008. – 367 с.
28. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с.
29. Пряничников В.Е., Андреев В.П. др. Технологии модернизации и очувствления мобильных роботов специального назначения // Известия ЮФУ, 2011, №3 – с. 166 – 171.
30. Bichop R.H. Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators: Fundamentals and Modeling. Second Edition. The University of Texas at Austin U.S.A. CRC Press, 2007. – 712 p.

31. Moon F.C. Applied Dynamics. With Applications to Multibody and Mechatronic Systems. Second Edition. Cornell University. John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 581 p.
32. Ganesh R. Naik. Intelligent Mechatronics / Ganesh R. Naik – Rijeka: InTech, 2011. – P. 206.
33. Каширский В.Г., Медведев А.Е. Принципы автоматизированного управления одноковшовым карьерным экскаватором и функциональное диагностирование его электроприводов на основе компьютерных технологий // Вестник КузГТУ, 2005, №1 – С. 75 – 80.
34. Курцев Б.В., Жданов А.В. Методологические аспекты создания единого информационного пространства на горнодобывающем предприятии // Горный журнал, 2014, №4 – С. 29 – 31.
35. Экскаваторы карьерные ЭШ 6/45 ЭШ 10/70 ЭКГ-5А ЭКГ-8И ЭКГ-10 [Электронный ресурс] // ПКФ СтройНерудКомплект, Москва. 2005. URL: <http://www.snk-ltd.ru/catalog> (Дата обращения: 19.07.2014).
36. Карьерные экскаваторы СССР и США [Электронный ресурс] URL: <http://astr23.narod.ru/so.htm> (Дата обращения: 20.07.2014).
37. WK-75 Mining Excavator [Электронный ресурс] // Taiyuan Heavy Industry CO., LTD. 2012. URL: <http://tyhi.com/product.php/detail/pro/13> (Дата обращения: 20.07.2014).
38. Интеллектуальный карьер. Будущее горных технологий. VIST Mining Technology [Электронный ресурс] http://navitoring.ru/upload/medialibrary/9a1/navitoring_2013_vist_group.pdf (Дата обращения: 20.07.2014).
39. Your autopilot has arrived [Электронный ресурс] // Tesla Motors, Ink. 2003. URL: <https://www.teslamotors.com/blog/your-autopilot-has-arrived> (Дата обращения: 21.12.2015).

40. Лагунова Ю.А. Основные тезисы II Международной научно-практической конференции «Техгормет – 21 век» // Горное оборудование и электромеханика, 2012, №5 – С. 44 – 48.
41. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов // Автоматизация в промышленности, 2013, №10 – С. 33 – 37.
42. Малафеев С.И., Новгородов А.А., Серебренников Н.А. Новый экскаватор ЭКГ-18Р: система приводов постоянного тока с широтно-импульсным регулированием // Горное оборудование и электромеханика, 2012, №6. – С. 21 – 25.
43. Ефимов В.Н., Цветков В.Н., Садовников Е.М. Карьерные экскаваторы: Справочник рабочего. –М.: Недра, 1994. – 381 с., ил.
44. Пролетарский А.В., Алексеева Е.Ю. Интеллектуализированные системы управления летательными аппаратами // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2012, №9 – С. 219 – 236.
45. Смагин А.А. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / А.А. Смагин, С.В. Липатова, А.С. Мельниченко. – Ульяновск: УлГУ, 2010. – 136 с.
46. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Пospelов. Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту – М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.
47. Рассел С. Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход 2-е издание. – М.: Вильямс, 2006 – 1408 с.
48. Bellman R.E. An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computer Think? Boyd & Fraser Publishing Company, San Francisco. 1978.
49. Charniak E. and McDermott D. Introduction to Artificial Intelligence. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. 1985.
50. Haugeland J. (Ed.) Artificial Intelligence: The Very Idea. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1985.

51. Kurzweil R. The Age of Intelligent Machines. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1990.
52. Nilsson N.J. Artificial Intelligence: A New Synthesis. Morgan Kaufmann, San Mateo, California. 1998.
53. Poole D., Mackworth A. K., and Goebel R. Computational intelligence: A logical approach. Oxford University Press, Oxford, UK. 1998.
54. Rich E. and Knight K. Artificial Intelligence (second edition). McGraw-Hill, New York. 1991.
55. Winston P.H. Artificial Intelligence (Third edition). Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. 1992.
56. Макаров И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; отдел информ. технологий и вычисл. систем РАН. - М.: Наука, 2006. - 333 с.
57. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 348 с.
58. P&H Centurion Shovel Control [Электронный ресурс] URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/joy-global-surface-mining-p-h-mining-equipment-i/p-h-centurion-shovel-control/40115-154685.html> (Дата обращения: 19.07.2014).
59. Bucyrus 495 HD. Экскаватор канатный полноповоротного типа. Краткое руководство по эксплуатации. Bucyrus International, Inc. 2011. – 96 с.
60. Велихов А.В., Строчников К.С., Леонтьев Б.К. Компьютерные сети: Учебное пособие по администрированию локальных и объединенных сетей, – 2-е изд., – 2004. – 320 с.
61. Кульгин М.В. Компьютерные сети. Практика построения. Для профессионалов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 462 с., ил.
62. Куроуз Дж., Росс К. Компьютерные сети. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с., ил.

63. Браун С. Виртуальные частные сети. – М.: Лори, 2001. – 508 с.
64. Биячуев Т.А. / под ред. Л.Г. Осовецкого. Безопасность корпоративных сетей. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2004. – 161 с.
65. Норткат С., Новак Д. Обнаружение нарушений безопасности в сетях, 3-е издание.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. – 448 с., ил.
66. Новиков Ю.В., Кондратенко С.В. – Локальные сети: архитектура, алгоритмы, проектирование. М.: Издательство ЭКОМ, 2000. – 312 с., ил.
67. Единое информационное пространство – Life-Prog [Электронный ресурс] http://life-prog.ru/view_zam2.php?id=104&cat=4&page=1 (Дата обращения: 19.07.2014).
68. Internet of Things [Электронный ресурс] // Garther IT glossary. 2012. URL: <http://blogs.gartner.com/it-glossary/internet-of-things/> (Дата обращения: 02.04.2015).
69. That «Internet of Things» Thing. In the real world, things matter more than ideas [Электронный ресурс] // Kevin Ashton. 2009. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986> (Дата обращения: 02.04.2015).
70. Устройство мониторинга экскаватора УМЭ-02 [Электронный ресурс] // АйСиТи Автоматизация. URL: <http://www.ictglobal.ru/attachments/competence/ume02.pdf> (Дата обращения: 20.07.2014).
71. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336с., ил.
72. Malafeev S.I., Tikhonov Y.V. Intellectualization of a career excavator / Reports of the XXIII International Scientific Symposium «Miner's week – 2015». 26 – 30 January, 2015. Moscow. – P. 619 – 626.
73. 4. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Интеллектуализация карьерного экскаватора / Горный информационно - аналитический бюллетень, 2015, №11. – С. 107 – 115..

74. Ключков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: МГУЛ, 2008 – 124 с.
75. Евгеньев Г.Б., Кобелев А.С., Кокорев А.А., Стисес А.Г. CASE-технология создания многоагентных САПР изделий машиностроения // Известия ЮФУ, 2003, №2 – с. 140 – 147.
76. Тихонов Ю.В. Разработка программного комплекса для интеллектуального экскаватора // XXXIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Научные труды международной молодежной научной конференции в 8-ми т. Т. 1. – М.: МАТИ, 2013. – С. 179 – 180.
77. Бабокин Г.И., Степанов В.М., Шпрехер Д.М. Программно-аппаратные устройства диагностирования электромеханических систем // Известия ТулГУ. Технические науки, 2014, №8 – С. 83 – 87.
78. Норткат, Стивен, Новак, Джуди. Обнаружение нарушений безопасности в сетях, 3-е издание.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. – 448 с., ил.
79. Мартко Е.О. Модели надежности и технического состояния изоляции электродвигателей, используемые для прогнозирования выхода из строя // Ползуновский вестник, 2013, №4-2 – С. 138 – 142.
80. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин (свойства, характеристики, эксплуатация). – М., Энергия, 1974. – 272 с.
81. Лившиц П.С. Щетки электрических машин. – М., Энергоатомиздат, 1989. – С. 25-28.
82. Тэйлор Дж. Введение в теорию ошибок / Пер. с англ. - М., Мир, 1985. – 272 с.
83. А. А. Губко, Е. А. Губко. Электрооборудование и электроснабжение горных предприятий: учебное пособие. 2-е издание, доп. и перераб. – Ленинск-Кузнецкий: ОАО "Ленинск-Кузнецкая типография", 2008. – 532 с.

84. Малафеев С.И., Копейкин А.И., Тихонов Ю.В. Компьютерная система для экспериментальных исследований электромеханических колебательных систем // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения». Труды конференции. – М.: ИМАШ РАН, 2013. – С. 57.
85. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с., ил.
86. Гук М. Аппаратные средства локальных сетей. Энциклопедия – СПб: Издательство «Питер», 2000. – 576 с., ил.
87. Малафеев С.И., Захаров А.В. Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах // Электротехника, 2008, №7. – С. 2 – 5.
88. Патент А.с. 662820 СССР. Способ определения веса ковша экскаватора-драглайна. / В.Д. Потапов, А.П. Максимов, А.И. Филиппенко 1979 г. Бюл. № 18.
89. Калмыков С., Болдырева А., Федоровский В. Бортовые системы взвешивания и контроля за перегрузом [Электронный ресурс] // С. Калмыков, А. Болдырева, В. Федоровский. 2013. URL: <http://spbcolor.ru/wp-content/uploads/2014/01/weighting-system-onboard-ver-2014-preview.pdf> (Дата обращения: 19.07.2014).
90. Заявка на изобретение № 2014143668, от 28.10.2014. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. «Способ контроля массы при погрузке экскаватором грунта в автосамосвал».
91. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М. Нейросетевой контроль электромеханических систем // Известия вузов. Электромеханика, 2010, №4 – С. 18 – 20.
92. Файбисович В.А. Определение параметров электрических систем: Новые методы экспериментального определения. – М., Энергоиздат, 1982. – С. 20 – 29.

93. Балаев С.С., Способ внутривыпериодного измерения комплекса параметров трехфазной сети / Электричество, 2011, №1. – С. 26 – 31.
94. Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Абрамочкин Л.В. Идентификация погонных параметров протяженной линии электропередачи с использованием регистраторов аварийных сигналов / Известия Томского политехнического университета. 2011, Т. 318, №4. – С. 118 – 122.
95. Патент РФ №2556281, МПК G01R 27/08. Способ идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов. – Опувл. 10.07.2015. Бюлл. №19.
96. Малафеев С.И., Новгородов А.А., Серебренников. Н.А. Экскаватор ЭКГ-5А: новое техническое решение системы управления приводами // Горное оборудование и электромеханика, 2009, №11. – С. 23 – 28.
97. Патент РФ № 2536669, МПК G06G 7/63. Способ контроля и визуализации работы щеточно-коллекторного узла электрического двигателя постоянного тока / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов, Н.А. Серебренников. – Опувл. 27.12.2014. Бюлл. № 36.
98. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Автоматизированная диагностика электрооборудования горных машин на основе моделирования рабочих процессов // Автоматизация в промышленности, 2014, №7 – С. 9 – 13.
99. Мандыч Н.К. Ремонт электродвигателей. Пособие электромонтеру // Киев.: Тэхника 1989. – 152 с.
100. Комаров С.Г. Прибор для контроля искрения на коллекторе электрической машины постоянного тока. // Современная техника и технологии. – Январь, 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2013/01/1459> (Дата обращения: 19.07.2014).

101. Энергия ветра, ветрогенераторы – технологии и разработки // Генераторы постоянного тока. Якорь машины. Обмотка якоря. – Январь, 2011 [Электронный ресурс] URL: <http://vetrodvig.ru/?p=1313> (Дата обращения: 19.07.2014).
102. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Трение в коллекторно-щеточном узле электрической машины: особенности и определение ресурса щеток / Трибология и надежность: Труды XIII Международной конференции 11-13 сентября 2013. – СПб.: ИТМО, 2013. – С. 227 – 232.
103. Патент РФ № 2548020, МПК H01R 39/58. Способ контроля износа щеток и работы щеточно-коллекторного узла электрической машины / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов. – Оpubл. 10.04.2015. Бюлл. № 10.
104. Патент РФ №2559785, МПК G01R 31/00, H01F 41/12. Способ контроля ресурса изоляции силового трансформатора / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов. – Оpubл. 10.08.2015. Бюлл. №22.
105. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Оценивание остаточного ресурса силового трансформатора / Материалы четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Информационно - измерительные и управляющие системы военной техники». Владимир, 13 – 14 ноября 2014 г. – М.: РАРАН, 2014. – С. 106 – 108.
106. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. М.: Изд. стандартов, 2003.
107. Тихонов Ю.В. Оценивание остаточного ресурса автоматических выключателей // XXXX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Научные труды международной молодежной научной конференции в 8-ми т. Т. 1. – М.: МАТИ, 2014. – С. 100 – 101.
108. Патент РФ № 2550337, МПК G01R 31/327. Способ определения остаточного ресурса автоматических выключателей / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов. – Оpubл. 10.05.2015. Бюлл. № 13.

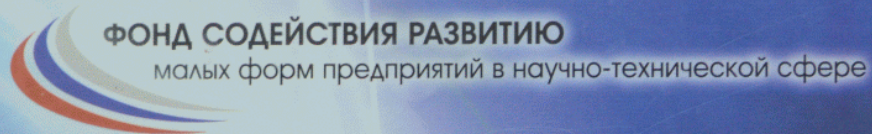
109. Twilio – APIs for Text Messaging, VoIP & Voice in the Cloud [Электронный ресурс] // Twilio. Сан-Франциско. 2007. URL: <https://www.twilio.com/> (Дата обращения: 11.01.2015).
110. Подробное сравнение популярных SMS Voice сервисов для рассылок и авторизаций [Электронный ресурс] // ТМ. Москва. 2006. URL: <http://habrahabr.ru/company/bankfilter/blog/227305/> (Дата обращения: 11.01.2015).
111. Малафеев С.И., Новгородов А.А., Серебренников Н.А. Экскаватор ЭКГ-12К: Новая система управления на основе IGBT-технологии / Горное оборудование и электромеханика, 2010, № 11. – С. 17 – 22.
112. Кабышев А. В., Тарасов Е. В. Низковольтные автоматические выключатели. Томск. Изд. Томского политехнического университета, 2011. – 345 с.
113. Омату С. Нейроуправление и его приложения Кн 2 / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. Пер. с англ. Н.В. Батина. Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с., ил.
114. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели. Учебное пособие. Воронежский Государственный университет, 1999 – 76 с.
115. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание. – М.: Вильямс. – 2006. 1104 с.
116. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – 2-е изд., стереотим. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с., ил.
117. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 496 с.
118. Беркинблит М.Б. Нейронные сети: Учебное пособие. – М.: МИРОС и ВЗМШ РАО, 1993. – 96 с., ил.
119. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с., ил.

120. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 94 с.
121. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Интеллектуальные информационные технологии: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с., ил.
122. Дубровин В.И., Субботин С.А. Алгоритмы ускоренного обучения персептронов // «Нейроинформатика-2002». - 7 стр.
123. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. – М.: Вильямс, 2001. – 287 с.
124. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с., ил.
125. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1981. – 288 с.
126. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В., Сагиров С.Н. Автоматизация исследований объектов в промышленности с использованием средств удаленного мониторинга / Автоматизация в промышленности, 2015, № 10. – С. 34 – 37.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Документы об участии в конкурсах





ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ

малых форм предприятий в научно-технической сфере

ДИПЛОМ

Победитель программы “Участник молодежного
научно-инновационного конкурса” (“УМНИК”)

ТИХОНОВ

ЮРИЙ

ВАСИЛЬЕВИЧ

*Председатель
Наблюдательного совета*

И.М. Бортник

*Генеральный директор
Фонда содействия развитию
малых форм предприятий
в научно-технической сфере*

С.Г. Поляков



Приложение 2. Документы об использовании результатов диссертационной работы



Компания "Объединенная Энергия"
Joint Power Co., Ltd.



Т+Ф: +7 - (495) 544-46-47, 558-83-83 факс (495) 544-46-07
 111672 г. Москва а/я 142 e-mail: jp@jpc.ru Http://www.jpc.ru

№ JP - 15 -0158
16 марта 2015 г.

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО Компания «Объединенная Энергия»
Н.А. Серебrenников
2015 г.

директор
 «Объединенная Энергия»

Акт
об использовании результатов научно-исследовательской работы

В период с 2013 г. по 2015 г. ООО «Компания «Объединенная Энергия» проводило научно-исследовательские работы, направленные на поиск и реализацию перспективных решений интеллектуализации карьерных экскаваторов при участии аспиранта Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых Ю.В. Тихонова. При этом с использованием результатов, полученных в кандидатской диссертации Ю.В. Тихонова, были предложены и реализованы:

1. Способ идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор, основанный на анализе токов и напряжений на вводе экскаватора в различных режимах его работы, и оценивания электропотребления экскаватора. Указанная работа выполнена в России впервые.
2. Методика интеллектуальной диагностики компонентов мехатронной системы экскаватора. Способ контроля щеточно-коллекторного узла двигателя постоянного тока. защищен патентом РФ № 2536669, МПК G06G 7/63. Оpubл. 27.12.2014, Бюл. № 36, авт. С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов, Н.А. Серебrenников).

Полученные в результате выполнения работ алгоритмы интеллектуальной диагностики компонентов мехатронных систем, идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор, использованы в инновационной деятельности ООО Компания «Объединенная Энергия», в том числе при выполнении договора № JP-13-110 от 05.09.2013 (Технический отчет 3431.06.ДП-ЭП.2014 ТО).

Эффективность использования научных результатов и практических рекомендаций определяется повышением технического уровня карьерных экскаваторов.

Главный инженер
 ООО Компания «Объединенная Энергия»

Главный конструктор
 ООО Компания «Объединенная Энергия»



О.Б. Баев



П.М. Афанасьев

Приложение 3. Листинг программного обеспечения для определения активного и реактивного сопротивлений ЭЛ

Программа на языке Python, описанная в данном приложении, предназначена для решения системы уравнений (1).

$$\begin{cases} U_0^2 = (U_1 + rI_1 \cos \varphi_1 - xI_1 \sin \varphi_1)^2 + (rI_1 \sin \varphi_1 + xI_1 \cos \varphi_1)^2; \\ U_0^2 = (U_2 - rI_2 \cos \varphi_2 - xI_2 \sin \varphi_2)^2 + (rI_2 \sin \varphi_2 + xI_2 \cos \varphi_2)^2, \end{cases} \quad (1)$$

где:

- I_1 – максимального значения тока в режиме потребления электрической энергии, ему соответствует напряжение U_1 и угол сдвига фаз между током и напряжением φ_1 ;
- I_2 – максимального значения тока в режиме рекуперации электрической энергии, ему соответствует напряжение U_2 и угол сдвига фаз между током и напряжением φ_2 ;
- U_0 – действующее значение напряжения, которому соответствует действующее значение тока $I_0 \approx 0$.

Решение проводится либо методом перебора, либо методом простых итераций (метод определяется значением переменной BRUT).

Примечание: значения токов и $\cos(\varphi)$ нужно вводить без знака.

Листинг программы:

```
#-----
#      начальные условия
#-----

x      = 9.0
BRUT   = False
PTS    = 1e4
```

```

#-----
#          ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
#-----

I1 = 132.6
I2 = 52.7    # знак не указывается
E  = 5780.0/3.0**0.5
U1 = 4850.0/3.0**0.5
U2 = 6030.0/3.0**0.5
cfi1 = 0.9 # знак не указывается
cfi2 = 0.5 # знак не указывается

#-----

sfi1 = (1.0-cfi1**2)**0.5
sfi2 = (1.0-cfi2**2)**0.5

#-----
# Метод простых итераций
#-----

global roots
roots = []

def find_R(num, x): # вычисление R
    a = (I1*cfi1)**2.0 + (I1*sfi1)**2.0
    b = 2*U1*I1*cfi1
    c = U1**2-E**2+x**2*a+2*U1*x*I1*sfi1
    D = b**2-4*a*c
    if (D < 0): return False
    r1 = (-b-D**0.5) / (2*a)
    r2 = (-b+D**0.5) / (2*a)
    find_X(num-1, r1)
    find_X(num-1, r2)
    return True

```

```

def find_X(num, r): # вычисление X
    a = (I2*cfi2)**2.0 + (I2*sfi2)**2.0
    b = -2*U2*I2*sfi2
    c = U2**2-E**2+r**2*a-2*U2*r*I2*cfi2
    D = b**2-4*a*c
    if (D < 0): return False
    x1 = (-b-D**0.5) / (2*a)
    x2 = (-b+D**0.5) / (2*a)

    stop = False
    if num > 0:
        if not find_R(num-1, x1): stop = True
        if not find_R(num-1, x2): stop = True
        #stop = False
    if (num <= 0 or stop) and r > 0.0:
        if x1 > 0: add_root(x1,r)
        if x2 > 0: add_root(x2,r)
    return True

```

```

#-----
#      Служебные функции
#-----

```

```

def verif(x,r): # проверка решения
    a = E**2
    b = (U1+r*I1*cfi1+x*I1*sfi1)**2
    c = (r*I1*sfi1-x*I1*cfi1)**2
    D1 = abs(a - b - c)
    a = E**2
    b = (U2-r*I2*cfi2-x*I2*sfi2)**2
    c = (r*I2*sfi2-x*I2*cfi2)**2
    D2 = abs(a - b - c)
    D = max(D1,D2)**0.5
    return D

```

```

def add_root(x,r): # добавление решения в список
    global roots
    tol = verif(x,r)
    roots += [[x,r,tol]]

def find_min_root(): # поиск лучшего решения
    global roots
    D = 1e9
    for ptr in roots:
        if ptr[2] < D: D = ptr[2]
    for ptr in roots:
        if ptr[2] == D:
            x = round(ptr[0],3)
            r = round(ptr[1],3)
            t = round(ptr[2],1)
            s = 'x = {0}, r = {1}, tolerance: {2}'
            print s.format(x,r,t)
            return

#-----
#      Метод перебора
#-----

def find_R2(x):
    a = (I1*cfil)**2.0 + (I1*sfil)**2.0
    b = 2*U1*I1*cfil
    c = U1**2-E**2+x**2*a+2*U1*x*I1*sfil
    D = b**2-4*a*c
    if (D < 0): return []
    r1 = (-b-D**0.5) / (2*a)
    r2 = (-b+D**0.5) / (2*a)
    ans = []
    if r1 > 0: ans += [r1]
    if r2 > 0: ans += [r2]
    return ans

```

```

def brut_force(points):
    global roots
    import numpy as np
    X = np.linspace(-100.0,100.0,points)
    for x in X:
        R = find_R2(x)
        for r in R: roots += [[x,r,verif(x,r)]]

#-----
#          Пуск
#-----

import sys
sys.setrecursionlimit(5000)

if BRUT: brut_force(PTS)
else:    find_R(100,x)

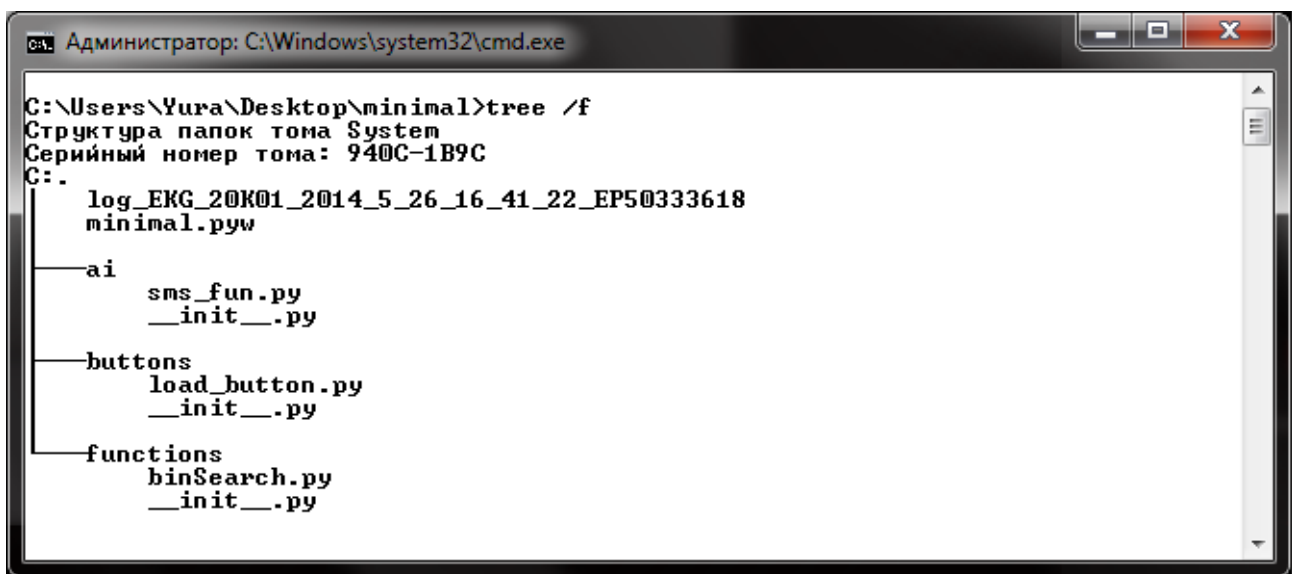
find_min_root()

```

Приложение 4. Листинг программного обеспечения DAT-Reader

В данном приложении приводятся исходные коды сокращенной версии программы DAT-Reader. Структура директорий этой программы приведена на рисунке 1. Исполняемым файлом является файл «*minimal.pyw*». Для нормальной работы программного обеспечения требуется наличие на компьютере интерпретатора языка Python версии 2.7 и пакета дополнительных модулей, в том числе pylab, struct, numpy и twilio.

Файл log_EKG_20K01_2014_5_26_16_41_22_EP50333618 получен из информационно - диагностической системы «ПУЛЬСАР-7» экскаватора ЭКГ-20К. Программа способна работать и с другими экскаваторами, в том числе ЭКГ-10Т, ЭКГ-15Т и ЭКГ-18Р.



```
Администратор: C:\Windows\system32\cmd.exe

C:\Users\Yura\Desktop\minimal>tree /f
Структура папок тома System
Серийный номер тома: 940C-1B9C
C:.
  log_EKG_20K01_2014_5_26_16_41_22_EP50333618
  minimal.pyw
  ai
    sms_fun.py
    __init__.py
  buttons
    load_button.py
    __init__.py
  functions
    binSearch.py
    __init__.py
```

Рисунок 1 – Структура директорий сокращенной версии ПО DAT-Reader

Файлы «*__init__.py*» не содержат в себе никакой информации, они предназначены для нормальной работы интерпретатора python 2.7. «*load-button.py*» используется для загрузки данных в ОЗУ, «*binSearch.py*» предназначен, для поиска данных в файлах системы «ПУЛЬСАР-7», «*sms_fun.py*» проводит всю необходимую обработку данных и, в случае необходимости, – отправку SMS.

minimal.pyw

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: CP1251 -*-

#=====
#  Загрузка библиотек
#=====

import pylab                # построение графиков (GUI)
import struct               # библиотека для парсинга
import numpy as np         # математическая библиотека
import math                 # стандартная математика
import Tkinter              # библиотека GUI
import tkFileDialog as tkf  # диалоговые окна открыть/заккрыть файл
import tkMessageBox as tkm # диалоговые окна месседж-боксы
import ttk                  # дополнительные элементы GUI

import buttons.load_button  as lbtn_h  # событие от кнопки lbtn

from matplotlib.dates import date2num # преобразование pydate -> int
import functions.binSearch as bs      # поиск данных в файле

import os
from os.path import isfile, join
import ai.sms_fun as sf

#=====

global data_dic, MAX_ARRAY
MAX_ARRAY = [200000]
NOW_ARRAY = [0]

Ubb_A = np.zeros(MAX_ARRAY)
Ibb_A = np.zeros(MAX_ARRAY)
```

```

Ibb_B = np.zeros(MAX_ARRAY)
cos_fi = np.zeros(MAX_ARRAY)
time = np.zeros(MAX_ARRAY)
pytime = np.zeros(MAX_ARRAY)
yvv_condition = np.zeros(MAX_ARRAY[0])

data_dic = { 'Ubb phase A':Ubb_A, 'Ibb phase A':Ibb_A,\
'Ibb phase B':Ibb_B}
data_dic.update({'cos(fi)':cos_fi, 'time':time, 'pytime':pytime })
data_dic.update({'yvv_condition':yvv_condition})

class X(object):
    def __init__(self,length):
        self.length = length
    def get(self):
        return self.length

class GUI_dummy(object):          # упрощенный gui с одной кнопкой
    def __init__(self,length):
        self.load_select = X('user')
        self.from_frame_item = X(0)
        self.to_frame_item = X(length)
        self.root = Tkinter.Tk()
        self.root.minsize(180,80)
        self.root.maxsize(180,80)
        self.root.title('DAT')
        obtn = Tkinter.Button(self.root)
        obtn['text']    = u'Run Analyse'
        obtn['bg']      = 'darkred'
        obtn['fg']      = 'white'
        obtn.grid(row=1,column=1,padx=50,pady=30)
        obtn.bind('<Button-1>',self.work_click)
    def refrash(self):
        pass

```



```

def run(self):
    self.root.mainloop()
def work_click(self,event):
    lbtn_h.lbtn_click(self.root) # имитация кнопки "load"
    sf.found_problems(data_dic,NOW_ARRAY, False)
    self.root.destroy()

def last_name():
    path = os.path.abspath(os.curdir)
    onlyfiles = [ f for f in os.listdir(path) if
isfile(join(path,f)) ]
    onlyfiles.reverse()
    for f in onlyfiles:
        if "log_EKG" in f: return [f]
    return None

def run():
    if last_name() == None:
        print 'Nothing to compute...'
        return
    file_names = last_name()
    print file_names
    file_length = os.path.getsize(file_names[0])
    start_end_point = [0,(file_length/640 - 1)]
    NOW_ARRAY[0] = start_end_point[1]

    lbtn_h.file_names = bs.file_names = file_names
    bs.start_end_point = start_end_point
    lbtn_h.data_dic = data_dic
    lbtn_h.MAX_ARRAY = MAX_ARRAY
    lbtn_h.NOW_ARRAY = NOW_ARRAY
    a = GUI_dummy(NOW_ARRAY[0])
    lbtn_h.a = a
    a.run()
run()

```

load_button.py

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: CP1251 -*-

#=====
#  Загрузка библиотек
#=====

import pylab                # построение графиков (GUI)
import struct               # библиотека для парсинга
import numpy as np          # математическая библиотека
import math                 # стандартная математика
import Tkinter              # библиотека GUI
import tkFileDialog as tkf  # диалоговые окна открыть/заккрыть файл
import tkMessageBox as tkm # диалоговые окна месседж-боксы
import ttk                  # дополнительные элементы GUI
import datetime as dt       # работа со временем

from matplotlib.dates import date2num # преобразование pydate -> int
import functions.binSearch as bs      # поиск данных в файле

#=====

global a, data_dic, file_names, MAX_ARRAY, NOW_ARRAY

def lbtn_click(event):
    global a, data_dic, file_names, MAX_ARRAY, NOW_ARRAY
    n_from = 0
    n_end = 0
    now = a.load_select.get()
    if now != 'user':
        try:
            dat = dt.datetime.strptime(now, '%Y-%m-%d')
            n_start = bs.find_start(dat, 0)
```

```

a.from_frame_item.delete(0,Tkinter.END)
a.from_frame_item.insert(0,str(n_start)) # начало
n_end = bs.find_end(dat,0)
a.to_frame_item.delete(0,Tkinter.END)
a.to_frame_item.insert(0,str(n_end)) # начальная точка
except:
    tkm.showerror(u'Error!', u'Error with date finding!')
    a.refrash() # "освежаем" окно
    return
else:
    try:
        n_start = int ( a.from_frame_item.get() )
        n_end    = int ( a.to_frame_item.get() )
    except:
        tkm.showerror(u'Error!', u'Error with date finding!')
        a.refrash() # "освежаем" окно
        return

#=====
# считываем данные из файла в массив
#=====

data_dic['Ubb phase A'] = np.zeros(MAX_ARRAY[0])
data_dic['Ibb phase A'] = np.zeros(MAX_ARRAY[0])
data_dic['Ibb phase B'] = np.zeros(MAX_ARRAY[0])
data_dic['cos(fi)'] = np.zeros(MAX_ARRAY[0])
data_dic['time'] = np.zeros(MAX_ARRAY[0])
NOW_ARRAY[0] = 0
file_num = 0
input_data = open(file_names[file_num], 'rb', 0) # открываем файл
i = 0
for k in range(n_start,n_end):
    now = get_data(input_data, k)
    if (now[0] > date2num(dt.datetime(2000,1,1, 0,0,0,0))):
        data_dic['Ubb phase A'][i] = now[1] / 128.0*607.0*27.7

```

```

        data_dic['Ibb phase A'][i] = now[2] / 128.0*288.0
        data_dic['Ibb phase B'][i] = now[3] / 128.0*288.0
        data_dic['yv_vv_condition'][i] = now[4]
        data_dic['cos(fi)'][i] = 0.9
        data_dic['time'][i] = now[0]

        i += 1 # номер реальной ячейки, с которой мы работаем
    NOW_ARRAY[0] = i
    input_data.close()
    tkm.showinfo(u'Reading success!',\
'Data length = %d points' % NOW_ARRAY[0])
    a.refrash() # "освежаем" окно, чтобы не было "западающих кнопок"

#=====

def get_data(input_data, position):
    input_data.seek(position*640)
    d = input_data.read(16)
    d = input_data.read(624)
    t = d[589:599] + ' ' + d[614:622]
    t = dt.datetime.strptime(t, '%d.%m.%Y %H:%M:%S')
    d = struct.unpack('B'*624, d)
    time = date2num(t)
    yv_vv = d[495:543] # данные из ЯВВ
    Ua_rms = 0.0
    Ia_rms = 0.0
    Ib_rms = 0.0
    for j in range(12):
        Ua_rms += yv_vv[j*4] / 12.0
        Ia_rms += yv_vv[j*4+1] / 12.0
        Ib_rms += yv_vv[j*4+2] / 12.0
    yv_vv_state = d[550:552]
    return [time, Ua_rms, Ia_rms, Ib_rms, yv_vv_state[0]]

#=====

def compute_cos(x): pass #заглушка

```

binSearch.py

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: CP1251 -*-

#=====

import pylab                # построение графиков (GUI)
import struct               # библиотека для парсинга
import numpy as np          # математическая библиотека
import math                 # стандартная математика
import Tkinter              # библиотека GUI
import tkFileDialog as tkf  # диалоговые окна открыть/закрыть файл
import tkMessageBox as tkm  # диалоговые окна месседж-боксы
import ttk                  # дополнительные элементы GUI
import datetime as dt       # библиотека для работы со временем

#=====

global file_names, start_end_point

def bin_find_day(date, file_num):
    global file_names, start_end_point
    try:
        input_data = open(file_names[file_num], 'rb', 0) # откр. Файл
        i = start_end_point[0]
        j = start_end_point[1] - 1
        k = 0
        while (True):
            k = (i+j)/2
            if (date > get_item(input_data, k)): i = k+1
            else: j = k-1
            if not (get_item(input_data, k) != date and i <= j): break
    except:
```

```

        tkm.showerror(u'Error!', u'File no found!')
        return -1
    input_data.close()
    return k

def std_find_day(date, file_num):
    global file_names, start_end_point
    try:
        input_data = open(file_names[file_num], 'rb', 0) # откр. файл
        i = start_end_point[0]
        j = start_end_point[1] - 1
        for k in range(i, j+1):
            if ( get_item(input_data, k) > date ): break
    except:
        tkm.showerror(u'Error!', u'File no found!')
        return -1
    input_data.close()
    return k + 1

def get_item(input_data, position):
    input_data.seek(position*640)
    d = input_data.read(16)
    d = input_data.read(624)
    t = d[589:599] + ' ' + d[614:622]
    time = dt.datetime.strptime(t, '%d.%m.%Y %H:%M:%S')

    if time < dt.datetime(2000, 1, 1):
        return get_item(input_data, position-1)
    return time

def find_start(date, file_num):
    now = date.replace(hour=0, minute=0, second=0, microsecond=0)
    return bin_find_day(now, file_num)

def find_end(date, file_num):

```

```

m = 999999
now = date.replace(hour=23,minute=59,second=59,microsecond=m)
return bin_find_day(now,file_num) - 2

```

sms_fun.py

```

#!/usr/bin/python
# -*- coding: CP1251 -*-

#=====
#  Загрузка библиотек
#=====

import pylab                # построение графиков (GUI)
import struct               # библиотека для парсинга
import numpy as np          # математическая библиотека
import math                 # стандартная математика
import Tkinter              # библиотека GUI
import tkFileDialog as tkf  # диалоговые окна открыть/закрыть файл
import tkMessageBox as tkm # диалоговые окна месседж-боксы
import ttk                  # дополнительные элементы GUI

from matplotlib.dates import num2date # преобраз. int -> datetime

#=====

def complete_analyse(data_dic,NOW_ARRAY,quite=False):
point = 0 # точка поиска
log    = [] # список ошибок

while(get_next_point(data_dic,NOW_ARRAY,point) != None):
point = get_next_point(data_dic,NOW_ARRAY,point)
line  = get_line(data_dic,NOW_ARRAY,point)
if line != None:
time = num2date(data_dic['time'][point])

```

```

log.append( line + [time] )

if not quite:
if (log != []):
t = str( log[-1][2].time() )
d = str( log[-1][2].date() )
E = round(log[-1][0],1)
z = round(log[-1][1],2)
s = "Last Line Calculation:\n"
s += "E = {0}\nz = {1}\ntime = {2}\ndate = {3}".format(E, z, t, d)
tkm.showinfo('AI Analyse',s)
else:
tkm.showinfo('AI Analyse','All Good!')
return log

def found_problems(data_dic,NOW_ARRAY, quite=False):
prob = complete_analyse(data_dic,NOW_ARRAY,True)
for now in prob:
if now[0] < 5800:
sms_send(now,quite)
return
if now[1] > 10.0:
sms_send(now,quite)
return
if not quite: tkm.showinfo('AI Analyse','All Good!')
return

def create_message(msg,quite=False):
ACCOUNT_SID = "****" # *** - персональные данные аккаунта
AUTH_TOKEN = "****"
shovel_phone = "+1****"
all_numbers = ["+7904****"]
try:
from twilio.rest import TwilioRestClient
client = TwilioRestClient(ACCOUNT_SID, AUTH_TOKEN)

```



```

for phone in all_numbers:
    client.messages.create(to=phone,\
        from_=shovel_phone, body=msg,)
    print "SMS was sent"
    if not quite: tk.showinfo('AI Analyse','SMS was sent')
except:
    print "Can't send mesage: {0}".format(msg)
    if not quite: tk.showinfo('AI Analyse',\
        "Can't send message")
    return

def sms_send(log,quite=False):
    t = str( log[2].time() )
    d = str( log[2].date() )
    E = round(log[0],1)
    z = round(log[1],2)
    m1 = "Problem with shovel: E = "
    msg = m1+"{0} z = {1} time = {2} date = {3}".format(E, z, t, d)
    create_message(msg,quite)
    return

def sms_test(data_dic,NOW_ARRAY):
    time = num2date( data_dic['time'][NOW_ARRAY[0]-1] )
    d = str( time.date() )
    t = str( time.time() )
    msg = "Date: {0}, Time: {1}".format(d,t)
    create_message(msg)
    return

def get_line(data_dic,NOW_ARRAY,to_):
    I0 = 1000.0 # минимальный ток
    I1 = 0.0    # максимальный ток потребления
    U0 = 0.0    # ЭДС
    U1 = 0.0    # напряжение при I1
    c    = 2.0  # соотношение сопротивлений (заранее известно)

```

```

cfi = 0.99 # cos(fi) для U1 и I1

if (to_ >= NOW_ARRAY[0]):
    return None

for i in range(max(to_-200,0),to_):
    if abs(data_dic['Ibb phase A'][i]) < I0:
        I0 = abs(data_dic['Ibb phase A'][i])
    U0 = data_dic['Ubb phase A'][i]
    for i in range(max(to_-200,0),to_):
        if (data_dic['Ibb phase A'][i] > I1) and\
            (data_dic['Ubb phase A'][i] < U0-5.0):
            I1 = data_dic['Ibb phase A'][i]
            U1 = data_dic['Ubb phase A'][i]

if (U0 < 1000 or U1 < 1000):
    return None

sfi = (1 - cfi**2.0)**0.5
a = c*I1*cfi + I1*sfi
b = c*I1*sfi - I1*cfi
g = U1**2.0 - U0**2.0
D = (2*U1*a)**2.0 - 4*g*(a**2.0+b**2.0)
x = (-2*U1*a+D**0.5) / (2*(a**2.0+b**2.0))
r = c*x
z = (r**2.0+x**2.0)**0.5
return [U0,z]

def get_next_point(data_dic,NOW_ARRAY,fr_):
    if fr_ > NOW_ARRAY[0]: return None
    elif fr_ < 0: fr_ = 0

    for i in range(fr_,NOW_ARRAY[0]):
        if int(data_dic['yv_v_condition'][i]) & 0x30 == 0:
            fr_ = i

```

```
break
```

```
for i in range(fr_,NOW_ARRAY[0]):  
    if int(data_dic['yvv_condition'][i]) & 0x30 != 0:  
        return i  
return None
```