

**ТИХОНОВ Юрий Васильевич**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ  
МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА**

Специальность 05.02.05 – роботы, мехатроника и робототехнические  
системы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель: **Малафеев Сергей Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Управление и информатика в технических и экономических системах» ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Официальные оппоненты: **Житников Борис Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
полковник внутренней службы, начальник  
кафедры специальной техники и информационных технологий ВЮИ ФСИН России, г. Владимир

**Кочуров Олег Михайлович**  
кандидат технических наук, научный сотрудник  
ООО НПФ «ЭЛНАП», г. Москва

Ведущая организация: ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «28» июня 2016 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д212.025.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru/index.php?id=140>

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ученому секретарю совета Д212.025.05 Новиковой Е.А.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.025.05,  
к. т. н., доцент



Новикова Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 полезных ископаемых.

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, Ю. Я. Вуль, А. Б. Ефременков, В. М. Завьялов, В. И. Ключев, А. Е. Козярук, А. А. Кулешов, А. В. Ляхомский, А. А. Мариев, А. Я. Микитченко, М. Б. Носырев, Р. Ю. Подэрни, Н. А. Серов, Н. Н. Чулков, С. Hendricks, J. Maercks, H. Wu и другие.

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, Vishor R.H., Moon F.C. и другие.

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 развития 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, безопасности проведения горных работ, а также снижение влияния человеческого фактора и доли ручного труда вплоть до полной роботизации горных машин.

Повышение уровня автоматизации мехатронного комплекса карьерного экскаватора предполагает использование методов искусственного интеллекта и новых информационных технологий, что необходимо для его интеграции в единое информационное пространство горного предприятия. Специфические

особенности открытых горных работ, такие как тяжелые условия эксплуатации, сложные климатические условия, передвижные электропитающие линии (ЭЛ) 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 экскаваторов 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).

Автор работы – победитель конкурса грантов молодых ученых администрации Владимирской области в 2013 г. и победитель конкурса грантов «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» в 2014 г.

**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 (АВ) 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. 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.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, основные положения, вынесенные на защиту, и кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние и тенденции развития карьерных экскаваторов в XXI веке. Выполненный анализ дает основание отметить следующие обстоятельства:

1. Современный карьерный экскаватор – это сложная и уникальная машина, жизненный цикл которой составляет более 20 лет, во время которого многократно производится 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.

**Во второй главе** приводятся результаты разработки структуры, моделей и компонентов интеллектуальной системы мехатронного комплекса карьерного экскаватора.

Общая структурная схема мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора представлена на рисунке 1.

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.

Интеллектуализацию карьерного экскаватора можно разделить на три взаимосвязанных направления:

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

К основным компонентам интеллектуального экскаватора относятся: система электропитания; электроприводы главного движения; система управления движением; информационная система и система телекоммуникаций, которые находятся в тесном взаимодействии в рамках единого информационного пространства.

*«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.

Интеллектуализация мехатронных систем электроприводов главного движения основывается на реализации принципов управления, обеспечивающих наилучшее взаимодействие всех компонентов системы, где дополнительно применяются адаптивные регуляторы, алгоритмы самонастройки, коррекция и предупреждение ошибочных действий машиниста, защита от ударов ковша и переподъема, а также эффективное электропотребление.

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

*Система «Электронный машинист»* – специальная программно-аппаратная система постоянного контроля работы экскаватора и его отдельных компонентов и формирования объективных данных обо всех системах экскаватора, включая самого 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, таким образом, система ЭМ реализует такую интеллектуальную возможности, как самоанализ.

*Система «Виртуальный экскаватор»* – система удаленного наблюдения за работой экскаватора и всех его компонентов. Система ВЭ обеспечивает создание из отдельных фрагментов единых информационных полей включающих машины, добывающие предприятия и изготовителей машин.

Система «Виртуальный экскаватор» обеспечивает обратную связь между горным и проектировочным предприятиями, при этом сотрудники проектировочного предприятия могут удаленно производить оценку эффективности использования компонентов мехатронного комплекса экскаватора и учитывать данные такой оценки при производстве новых и модернизации существующих экскаваторов.

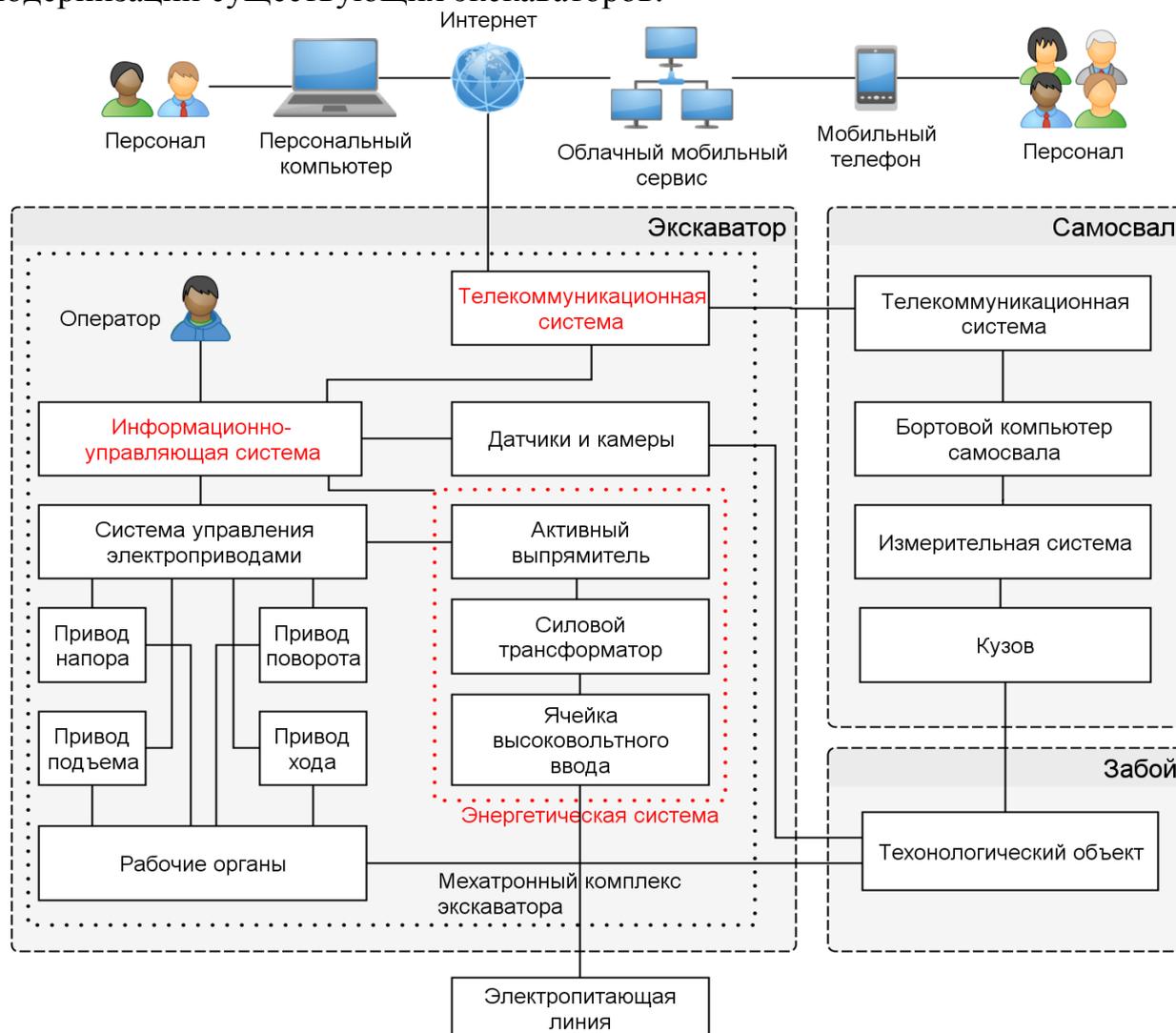


Рисунок 1 – Структурная схема мехатронного комплекса интеллектуального экскаватора

В третьей главе представлены результаты разработки системы «Электронный машинист» для современных карьерных экскаваторов российского производства, в частности ЭКГ-10Т, ЭКГ-15Т, ЭКГ-18Р и ЭКГ-20К. Основные функциональные возможности данной системы проиллюстрированы на рисунке 2.

Обработка данных является важной частью системы. К основным функциям обработки данных относятся: оценка эффективности работы экскаватора, оценка состояния оборудования и оценка ресурса компонентов 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). Система «Электронный машинист» позволяет

дополнительно рассчитывать следующие показатели, позволяющие оценить *эффективность работы экскаватора*: удельную энергоемкость экскавации  $p_э$ , общее время работы экскаватора  $t_{общ}$ , общее время погрузки  $t_{погр}$ , общее энергопотребление  $W_{общ}$ , энергопотребление при погрузке  $W_{погр}$ , среднюю мощность при простое  $P_{xx}$ , среднюю мощность при погрузке  $P_{погр}$ , общее количество загруженных самосвалов  $n_{сам}$ , общее количество загруженных ковшей  $n_{ковш}$  энергию, затрачиваемую на загрузку одного самосвала  $W_{сам}$ ,

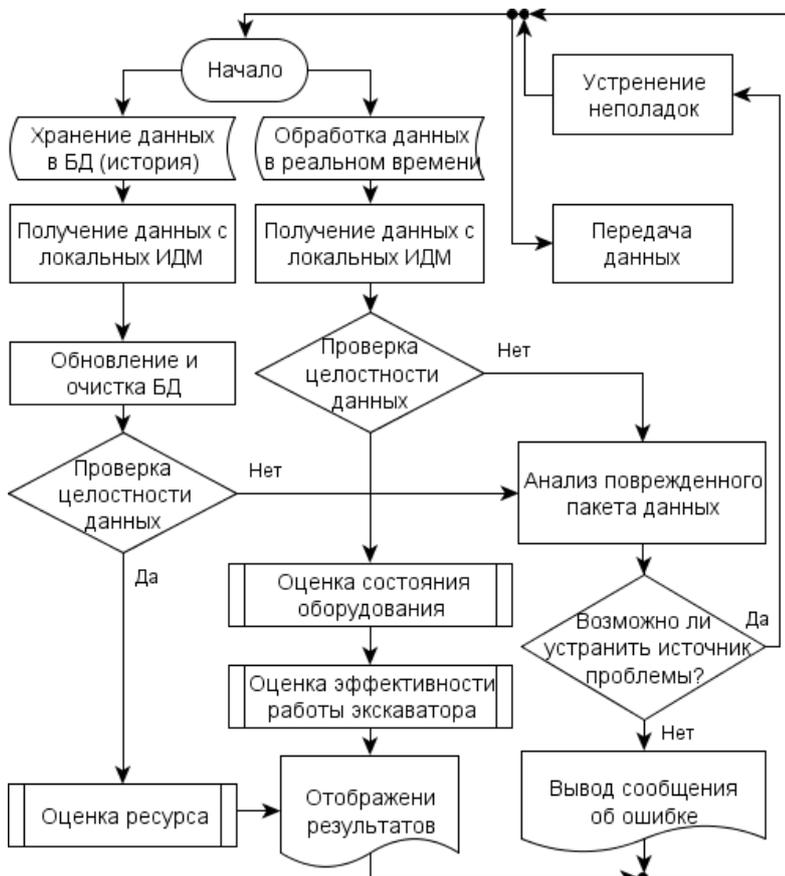


Рисунок 2 – блок-схема, поясняющая работу программно-аппаратного комплекса системы «Электронный машинист»

энергию, затрачиваемую на загрузку одного ковша  $W_{ковш}$ , среднее время загрузки одного самосвала  $t_{сам}$  и среднее время загрузки одного ковша  $t_{ковш}$ .

При оценке эффективности работы экскаватора требуется определять объем грунта, погружаемого экскаватором в кузов автосамосвала. Зная удельную плотность грунта, объем можно вычислить через массу.

Автором работы разработан способ контроля массы при погрузке экскаватором грунта в автосамосвал. Суть способа состоит в том, что грунт взвешивается в кузове автосамосвала, а результаты взвешивания передаются на бортовой компьютер

экскаватора посредством беспроводной сети, являющейся частью ЕИП.

Оценка состояния оборудования осуществляется на основе анализа переменных, поступающих из локальных информационно-диагностических модулей (ИДМ) с помощью нейронно-логического анализатора. Анализатор определяет принадлежность режима работы компонентов мехатронного комплекса (двигателей приводов главного движения, электропитающей системы и др.) к области нормальных, допустимых или аварийных режимов. При изменении режима работы одного из компонентов мехатронного комплекса, осуществляется протоколирование данного события.

Локальный ИДМ, размещенный в ячейке высоковольтного ввода (ЯВВ), регистрирует массивы мгновенных значений токов и напряжений питающей сети. Регистрируемые данные подвергаются математической обработке.

Производится вычисление действующих значений токов и напряжений путем усреднения за период напряжения питающей сети, сдвига фаз между током и напряжением и качественных показателей ЭЛ, таких как активное и реактивное сопротивление ЭЛ, а также ЭДС на передающем конце линии.

ЭДС на передающем конце линии определяют в момент времени, когда экскаватор не потребляет и не рекуперировывает ток ( $U_0 = E, I_0 = 0$ ). Значения активного  $r$  и реактивного  $x$  сопротивлений ЭЛ вычисляются путем решения системы уравнений:

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

где  $I_1$  – максимальное действующее значение тока в режиме потребления электрической энергии, которому соответствует действующее значение напряжения  $U_1$  и угла сдвига фаз  $\varphi_1$ ,  $I_2$  – максимальное действующее значение тока в режиме рекуперации электрической энергии, которому соответствует действующее значение напряжения  $U_2$  и угла сдвига фаз  $\varphi_2$ .

Параметры  $U_0$ ,  $r$  и  $x$  используются как для диагностики ЭЛ, так и для корректировки настроек СУ приводов главного движения.

Локальный ИДМ электродвигателей постоянного тока приводов главного движения, выполняет ряд математических вычислений, в частности 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,  $\xi$  – параметр, характеризующий искрение,  $i$  – ток двигателя,  $\Omega$  – угловая скорость двигателя;

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), если  $r_{\xi i} \ll r_{\xi \Omega}$ , то причины искрения механические (искрение зависит от скорости), если  $r_{\xi i} \approx r_{\xi \Omega}$  и  $r_{\xi i} \gg 0$ , то причины искрения – смешанные. На основании этих коэффициентов, также можно выполнять визуализацию искрения ЩКУ.

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

получаемые с помощью этих модулей в режиме реального времени, поступают на центральный компьютер, где производится их дальнейшая обработка.

Локальные ИДМ электроприводов выполняют математическое моделирование изнашивания щеток по следующей формуле:

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

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.

Локальные ИДМ силовых трансформаторов контролируют остаточный ресурс обмоток трансформаторов в режиме реального времени. Ресурс определяется по следующей формуле:

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

где  $T_0$  – номинальный ресурс трансформатора,  $k_1$  и  $k_2$  – весовые коэффициенты, равные расчетным коэффициентам ресурсного изнашивания трансформатора,  $\theta_H$  – номинальная температура обмоток трансформатора,  $\theta_n$  – температура наиболее нагретой точки трансформатора,  $\mu$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий температурный износ,  $n$  – количество процессов нарастания температуры наиболее нагретой точки трансформатора на величину  $\Delta\theta = \alpha\theta_H$ , где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от материалов обмоток и изоляции.

Помимо контроля ресурса трансформаторов, описанный выше способ может быть использован для контроля ресурса обмоток статора асинхронных двигателей.

Локальные ИДМ автоматических выключателей, производят математическое моделирование изнашивания контактов. Ресурс АВ определяется 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.

В работе рассматривается вопрос визуализации данных. В качестве новых методов визуализации предлагается использовать карты ресурса компонентов экскаватора, текстовые отчеты о состоянии оборудования, а также анимацию работы щеточно-коллекторных узлов электродвигателей приводов главного движения. Кроме того, важной является идея кроссплатформенности информационной системы, при таком подходе отчеты о состоянии машины могут отображаться не только на персональных компьютерах, но и на мобильных устройствах – сотовых телефонах и планшетных компьютерах.



Математическое описание включает в себя модели электроприводов главного движения, силового трансформатора и автоматического выключателя. Целью моделирования является имитация анализа работы, контроля и диагностики компонентов мехатронного комплекса экскаватора в автоматическом режиме на основе моделей физической надежности отдельных компонентов. Для этого, во-первых, производится непрерывная оценка и контроль ресурса каждого из компонентов мехатронного комплекса машины, а во-вторых выполняется оценка состояния оборудования посредством многослойного нейронного анализатора, построенного по топологии «рекуррентный персептрон», где результатом оценки является одно из трех состояний персептрона – «нормальный режим», «допустимый режим» или «аварийный режим». При проведении имитационного моделирования, в 90% случаев, полученные результаты соответствовали действительности.

В четвертой главе представлены результаты практической реализации интеллектуальной информационно-аналитической системы экскаватора.

Приводится разработанная автором структура аппаратной части системы «Виртуальный экскаватор», объединяющей в единое информационное пространство машины и персонал горного и проектного предприятий.

Система «Виртуальный экскаватор» обеспечивает информационное взаимодействие предприятий посредством локальной вычислительной сети, сети Internet и сети телефонной связи с целью непрерывной информационной поддержки жизненного цикла машин (CALS-технология) и проектирования новых машин на основе изучения данных о работе машин текущего поколения.

Автором настоящей работы разработан пакет информационно-аналитического программного обеспечения для карьерного экскаватора. Данное программное обеспечение (ПО) имеет две версии: первая (CAN-Reader) предназначена для работы с файлами самописца, а вторая (DAT-Reader) – для работы с файлами ИДС «ПУЛЬСАР 7» (см. рисунок 4), обе версии ПО предназначены для работы со следующими экскаваторами: ЭКГ-10Т, ЭКГ-12Т, ЭКГ-15Т, ЭКГ-18Р и ЭКГ-20К. Апробация программного обеспечения проводилась на ЭКГ-10Т, ЭКГ-15Т и ЭКГ-20К.

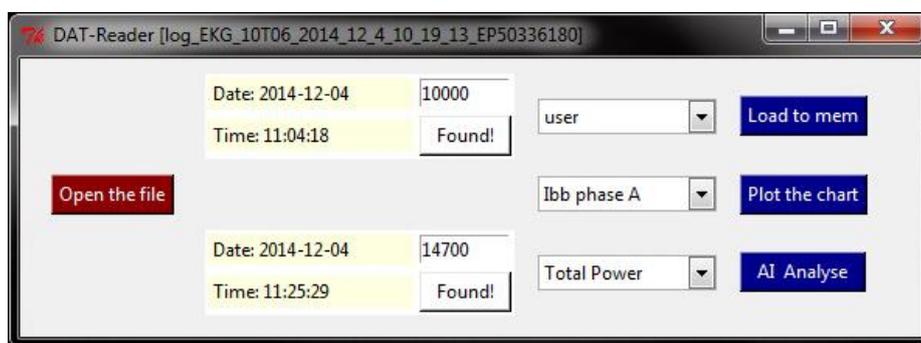


Рисунок 4 – Интерфейс программы DAT-Reader

Основными функциональными возможностями ПО являются:

- расчет средней полной, активной и реактивной мощности;
- расчет параметров линии электропитания;
- визуализация неполадок в работе мехатронного комплекса машины;

- определение количества циклов экскавации и количества загруженных экскаваторов с указанием времени погрузки;
- генерация отчета об эффективности работы экскаватора;
- автоматический анализ работы машины с функцией отправки SMS.

Наиболее важными возможностями программного комплекса являются функция генерации отчета об эффективности работы экскаватора и функция определения параметров линии электропитания.

Пример отчета об эффективности работы машины приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные показатели эффективности работы экскаватора ЭКГ-10Т

№	Параметр	Значение	Ед. измерения
1	Общее время работы экскаватора	27,0	мин
2	Общее время погрузки	9,0	мин
3	Общее время простоя	18,0	мин
4	Процент времени погрузки	33,67	%
5	Процент времени простоя	66,33	%
6	Общее энергопотребление	70,86	кВт·ч
7	Энергия при погрузке	37,03	кВт·ч
8	Энергия при простое	33,83	кВт·ч
9	Средняя мощность	157,37	кВт
10	Средняя мощность при погрузке	244,28	кВт
11	Средняя мощность при простое	113,25	кВт
12	Общее количество загруженных самосвалов	6	шт
13	Энергия, затрачиваемая на загрузку самосвала	6,17	кВт·ч
14	Время загрузки одного самосвала	1,52	мин
15	Энергоемкость экскавации (полная)	0,39	кВт·ч/м <sup>3</sup>
16	Энергоемкость экскавации (при работе)	0,21	кВт·ч/м <sup>3</sup>

Данный отчет сгенерирован программой при изучении данных с экскаватора ЭКГ-10Т. В отчете электропотребление разделено на две составляющие: при погрузке и при простоях. Увеличение доли времени на ожидание подачи транспорта, подготовительные операции и др., увеличивает общее удельное электропотребление экскавации. Непрерывное исследование энергопотребления позволяет оценивать эффективность организации и оперативно корректировать работу горного предприятия, в частности, управление подачей автосамосвалов.

Пример реальных графиков тока и напряжения на ЯВВ экскаватора ЭКГ-15Т, а также оценка параметров линии электропитания приведены на рисунке 5.

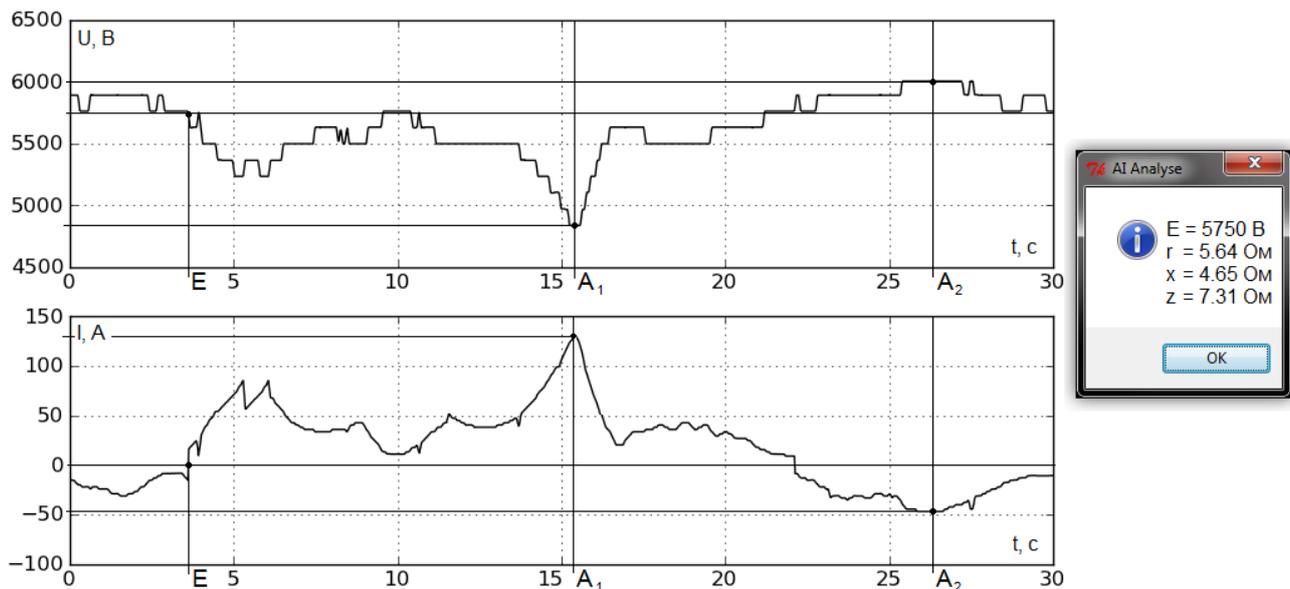


Рисунок 5 – Оценка параметров ЭЛ, питающей экскаватор ЭКГ-15Т во время работы

В данном примере, напряжение на подстанции опустилось ниже предельно допустимых 6000 В. В таком режиме система управления электроприводами экскаватора может автоматически изменить настройки и экскаватор продолжит работы, но с меньшей производительностью.

## 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 90% соответствием результатов компьютерного моделирования и реальных показателей, полученных в ходе эксплуатации карьерных экскаваторов. Экспериментальные данные получены совместно с ООО «Компания Объединенная Энергия».

2. Предложена 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 информационной системы, телекоммуникационное оборудование, и локальные ИДМ, 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, позволяющий проводить постоянный мониторинг работы экскаватора и его отдельных компонентов, формировать объективные данные обо всех системах экскаватора (включая машиниста), окружающей среде и системе электропитания.

4. Разработана 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, реализующая непрерывную информационную поддержку жизненного цикла экскаваторов, а также подготовки исходных данных для проектирования новых машин на основе анализа состояния компонентов машин текущего поколения.

5. Предложен 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, позволяющие выполнять автоматизированный анализ 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 мехатронного комплекса карьерного экскаватора и давать оценку работы его отдельных компонентов.

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.

### **Основные публикации по теме диссертации**

*Статьи в журналах из перечня ВАК РФ:*

1. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов / Автоматизация в промышленности, 2013, № 10. – С. 33 – 37.

2. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Автоматизированная диагностика электрооборудования горных машин на основе моделирования рабочих процессов / Автоматизация в промышленности, 2014, № 7. – С. 9 – 13.

3. 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.

4. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Интеллектуализация карьерного экскаватора / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015, №11. – С. 107 – 115.

#### *Патенты РФ:*

5. 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. – Оpubл. 27.12.2014. Бюлл. № 36.

6. 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.

7. 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.

8. Патент РФ №2556281, МПК G01R 27/08. Способ идентификации параметров линии электропередачи, питающей экскаватор / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов. – Оpubл. 10.07.2015. Бюлл. №19.

9. 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.

#### *Материалы международных и всероссийских научных мероприятий:*

10. Тихонов Ю.В. Разработка программного комплекса для интеллектуального экскаватора / XXXIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 9 – 13 апреля 2013 г. – М.: МАТИ, Т. 1. 2013. С. 179 – 180.

11. 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.

12. 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. Москва, 21 – 22 ноября 2013 г. – М.: ИМАШ РАН, 2013.

13. 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.

14. 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.

#### Личный вклад соискателя

[1,3,4,11,14] – разработка функциональной схемы и экспериментальные исследования; [2,5,6,7,8,9,13] – разработка функциональной схемы и алгоритма; [12] – программное обеспечение и анализ данных.