

На правах рукописи



Мещеряков Ярослав Евгеньевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА
И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель — доктор технических наук профессор

Кориков Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты:

Федосенков Борис Андреевич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационные и
автоматизированные производственные
системы», ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Шумилов Борис Михайлович,

доктор физико–математических наук,
профессор, профессор кафедры «Прикладная
математика», ФГБОУ ВО «Томский
государственный архитектурно–строительный
университет», г. Томск

Ведущая организация —

ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет»

Защита состоится «27» декабря 2018 г. в 15 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д212.268.02 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/w35t27go> и в Научной библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «__» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зайченко Татьяна
Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в угольной отрасли предъявляются высокие требования к качеству функционирования горных технологических машин (ГТМ), на которых часто отсутствуют устройства, позволяющие выполнять непрерывный мониторинг и позиционирование функциональных элементов ГТМ, регистрировать и анализировать полученную информацию для оценки качества выполнения горных работ. Существующие отечественные механические системы не отвечают современным требованиям по точности и надежности. Кроме того, на отечественных ГТМ отсутствуют устройства, позволяющие регистрировать и анализировать полученную информацию. Импортные устройства мониторинга недоступны из-за дороговизны и сложности в эксплуатации, имеют многоуровневый интерфейс, и для раскрытия всего потенциала системы требуется дорогостоящее дополнительное оборудование. К тому же, информация о выполнении рабочих циклов и динамических характеристиках ГТМ не является в существующих зарубежных системах превалирующей и не выводится на монитор.

Для угольной промышленности России в целом, и для угольных компаний, в частности, (например, компании «Кузбассразрезуголь»), одной из **актуальных** проблем является решение задач мониторинга и позиционирования функциональных элементов горных машин - для регистрации и анализа информации с целью повышения надежности и качества выполнения горных работ, обеспечения энерго- и ресурсосбережения.

Актуальной научно-технической задачей, в рамках указанной проблемы, является задача разработки автоматизированной системы, служащей для текущего мониторинга и позиционирования функциональных элементов ГТМ, идентификации рабочих циклов и оценки параметров технологического процесса экскавации (ТПЭ). Это достигается путем регистрации динамических характеристик в режиме реального времени и обработки результатов с помощью специализированного программного обеспечения. В отличие от существующих технических решений, элементы разрабатываемой автоматизированной системы унифицированы, она не требует подключения к бортовой электронике и системе управления ГТМ.

Таким образом, вопросы разработки и анализа автоматизированных систем мониторинга работы ГТМ представляют существенный интерес и являются актуальными как при проведении теоретических и экспериментальных исследований, так и при создании технических и программных средств автоматизированной системы.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам автоматизированного контроля функционирования ГТМ, создания комплексных

систем автоматизации и формирования оптимальных режимов эксплуатации объектов посвящено значительное число публикаций отечественных и зарубежных исследователей.

Большой вклад в развитие задач автоматизации ГТМ внесла группа исследователей под руководством профессора Певзнера Л.Д.: Югай И.С., Сулейменов Т.З., а также другие исследователи: Ломакин М.С., Ромашенков А.М., Самойленко А.М., Хайруллин Р. З., Щелков П.Ю., Гордеев–Бургвиц М.А. Известны научные работы в области интеллектуального и оптимального управления драглайнами зарубежных исследователей: Halatchev R.A., Knight P.F., Hall A.S., Westcott P., Bricker M.L., Key J.R., Chugh Y.P., Ehie I., Denby B., Schofield D., Singhal R.K, Naidu H.G., Singh S.P., Hrebar J., Henry J. Cook jr., Jones B.T., Humphrey J.D.

Разработкой и производством различных систем автоматизированного мониторинга занимаются следующие зарубежные компании: MineWare, Topcon, Trimble, Prolec, Leica Geosystems, Moba, Белгидросила. Одними из наиболее распространенных моделей систем автоматизированного мониторинга являются: Topcon X–32, Prolec Digmaster X, Moba Xsite Easy.

Объект исследования. Горные технологические машины, функционирующие на предприятиях Российской Федерации, в том числе, в компании «Кузбассразрезуголь», специализирующейся на добыче угля открытым способом.

Предметная область исследования. Процесс мониторинга и позиционирования функциональных элементов ГТМ во время технологического процесса экскавации горной массы.

Цель работы заключается в исследовании и разработке автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) основных функциональных элементов горных технологических машин, разработка и исследование алгоритмического, программного и технического обеспечения АСМП.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

1) проанализировать известные методы автоматизированного мониторинга и позиционирования, определить их особенности, достоинства и недостатки, выявить пути устранения последних;

2) исследовать объекты автоматизированного мониторинга драглайн ЭШ 10/50 или ЭШ 10/70 и мехлопату ЭКГ–8И, изучить их конструктивные, технологические особенности, режимы работы и эксплуатации;

3) разработать и апробировать способ и алгоритм идентификации и учета основных рабочих технологических состояний ГТМ;

4) исследовать элементную базу для АСМП, разработать и выполнить сборку основных модулей АСМП, протестировать и откалибровать датчики;

5) осуществить сбор данных с датчиков для компьютерного моделирования цифровых комплексующих фильтров в соответствии с выбранной элементной базой;

6) разработать и протестировать программное обеспечение АСМП;

7) провести экспериментальные исследования функционирования АСМП в лабораторных и производственных условиях, выполнить обработку полученных данных;

8) исследовать возможность применения изготовленного опытного образца АСМП для ГТМ на угольных разрезах компании «Кузбассразрезуголь», произвести серию производственных испытаний АСМП.

Научная новизна.

Основные отличия диссертационной работы от известных работ других авторов состоят в следующем.

1. Предложен и исследован новый метод идентификации технологического процесса экскавации, анализа рабочих состояний ГТМ и их динамических характеристик, позволяющий оценивать качество выполнения технологического процесса экскавации.

2. Разработаны и исследованы оригинальные алгоритмы повышения качества функционирования комплексующего фильтра Маджвика (рывковый фильтр, идентификации динамического состояния платформы ГТМ, коррекции по нулевой скорости, автоподстройки коэффициентов усиления фильтра Маджвика, коррекции фильтра Маджвика посредством глобальной навигационной спутниковой системы – (ГНСС)), отличающиеся от известных использованием сигналов ГНСС для коррекции работы фильтра по оси рысканья.

3. Разработана АСМП функциональных элементов ГТМ с соответствующим аппаратно–программным обеспечением, она отличается от известных решений модульной архитектурой, не критичностью к выбору радиоэлектронной элементной базы, способностью функционировать на любом типе ГТМ.

Теоретическая и практическая значимость работы. Основные положения диссертации вносят вклад в развитие автоматизированных систем мониторинга и управления ГТМ. Практическая значимость заключается в следующем.

1. Разработанные методы и калибровочные стенды могут использоваться при исследовании рабочих характеристик различных микроэлектромеханических систем (МЭМС-датчики), стенды позволяют выполнять тестирование и калибровку МЭМС-акселерометров (МА) и МЭМС-гироскопов (МГ), оценку точности и отладку фильтров для цифровой обработки сигналов.

2. Предложенный метод коррекции комплексирующего фильтра Маджвика, предназначенный для стабилизации и ориентации объектов, может быть применим в различных областях науки и техники.

3. Метод, на основе которого функционирует разработанная АСМП, может быть использован в строительстве (в технологии бестраншейной прокладки коммуникаций на территории существующей застройки) и военно-промышленном комплексе (для стабилизации грузовых и рабочих участков на морских кораблях, в системах стабилизации башенных орудий и т.д.).

4. Разработанный метод оценки эффективности функционирования ГТМ на основе алгоритма идентификации основных технологических состояний их элементов позволяет снизить время простоя, оптимизировать выполнение ряда операций ТПЭ.

5. Внедрение АСМП способствует повышению надёжности работы горной техники и качества выполняемых работ, обеспечению энерго- и ресурсосбережения.

Исследование и разработка АСМП проводились при финансовой поддержке программы «УМНИК–2014» (договоры № 0003972, 0019133, 0021603), Министерства науки и высшего образования РФ на 2017–2019 гг. (проект № 8.9628.2017/8.9), II Всероссийского конкурса научно–технических работ «Инновационная радиоэлектроника», угольной компании (УК) «Кузбассразрезуголь» (данное научное исследование является контрактной разработкой по заказу концерна «УГМК» для УК «Кузбассразрезуголь»).

Методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения сформулированных задач использованы методы теории автоматического управления, математической статистики, цифровой обработки сигналов, методы проектирования цифровых радиоэлектронных устройств.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Метод идентификации ТПЭ, обеспечивающий определение динамических, геометрических, пространственных и временных параметров рабочего состояния элементов ГТМ и оценку эффективности их функционирования.

Соответствует пункту 6 паспорта специальности 05.13.06: научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления.

2. Алгоритмы повышения качества функционирования комплексирующего фильтра Маджвика, обеспечивают быстроедействие АСМП при переходе в требуемый режим работы, нивелирование накапливающейся ошибки и устойчивое функционирование системы.

Соответствует пункту 10 паспорта специальности 05.13.06: методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.

3. АСМП обеспечивает непрерывный мониторинг динамических характеристик технологического процесса экскавации, упреждает аварийные режимы работы ГТМ.

Соответствует пункту 2 паспорта специальности 05.13.06: Автоматизация контроля и испытаний.

Степень достоверности и апробации результатов.

Достоверность полученных результатов научного исследования обеспечивается обоснованностью принятых допущений, проверенными статистическими методами, корреляцией теоретических и экспериментальных результатов с данными других исследователей, опирается на экспериментальные результаты исследований, полученные в натуральных и лабораторных условиях.

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на 11 Всероссийских и Международных конференциях, семинарах и интернет-конференциях.

Ряд положений и результатов диссертационного исследования использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО ТУСУР и ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева».

Публикации. По теме научного исследования опубликовано 17 работ, из которых 3 статьи в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в журналах, рецензируемых в базе данных Scopus; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором; совместно с научным руководителем, д.т.н., профессором А.М. Кориковым сформулированы тема диссертации, цель и задачи, решаемые в научной работе. Разработка АСМП выполнена автором по заказу компании «Кузбассразрезуголь»; совместно с главным инженером и техническим директором компании составлено техническое задание.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список использованной литературы, содержащий 150 наименований, список сокращений, 7 приложений. Общий объем диссертации составляет 170 страниц машинописного текста, включающий 64 рисунка, 10 таблиц, и 7 приложений на 25 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведены выносимые на защиту

положения, научная новизна, практическая значимость результатов, сведения об апробации работы, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе представлен обзор рынка средств автоматизированного контроля положения объектов управления в пространстве, который выявил необходимость создания унифицированной АСМП для различных типов ГТМ, позволяющей выполнять анализ эффективности функционирования ГТМ, в особенности, отечественного производства.

Выполнен сравнительный анализ алгоритмов комплексирования показаний МЭМС-датчиков, указаны особенности их применения, недостатки, достоинства, ограничения; оптимальным решением является использование фильтра Маджвика в реализации MARG для создания программного обеспечения АСМП.

Рассмотрены методы анализа стабильности МЭМС-датчиков динамических величин. Выполнен краткий анализ существующих методов определения стабильности и точности МЭМС-датчиков, показавший, что для последних характерно присутствие значительных шумовых составляющих в сигнале и нестабильность работы. Рациональным решением является исследование МА и МГ наложенной (перекрывающей) вариации Аллана, которая может функционировать на микроконтроллерах или программируемых логических интегральных схемах, удовлетворяет требованиям точности и стабильности.

Описаны МЭМС-датчики ускорения и угловой скорости, приведены их основные характеристики, принципы и режимы работы, определен критерий выбора элементной базы, датчиков МА и МГ. Установлено, что МГ функционирует в режиме датчика угловой скорости, МА - в режиме датчика кажущегося ускорения. Предлагается в качестве основы метода автоматизированного мониторинга использовать измерение угловой скорости и ускорений платформы ГТМ.

Сформированы и обоснованы критерии выбора МА и МГ для построения инерциального измерительного модуля (ИИМ) АСМП. Установлено, что целесообразно использовать следующие модели МЭМС-датчиков для создания ИИМ АСМП: МГ – ADIS 16260/16265; МА – SCA3100/SCA3300; ИИМ SCC2230–02. Для вспомогательных устройств - МА – AIS328DQ и МГ – A3G4250D.

Во второй главе исследован ТПЭ, объекты ГТМ - драглайн ЭШ10/50, ЭШ10/70 и мехлопата – ЭКГ-8И, режимы работы и эксплуатации, их конструктивные и технологические особенности; основные режимы работы АСМП функциональных узлов ГТМ.

Рассмотрены ГТМ и ТПЭ горной массы на угольном разрезе «Кедровский». Выполнена разработка алгоритмов идентификации рабочих циклов ГТМ драглайна и мехлопаты, алгоритмов определения геометрических, динамических, пространственных, временных параметров ГТМ. Разработан метод оценки

эффективности функционирования ГТМ на основе алгоритма идентификации основных технологических состояний ГТМ.

Процесс ТПЭ драглайнов/мехлопат характеризуется последовательной сменой технологических состояний: *черпание/копание* (1) – *транспортировка на разгрузку* (2) – *разгрузку* (3) – *транспортировка на черпание/копание* (4). ТПЭ мехлопаты аналогичен, за исключением отсутствия состояния *вспомогательные операции*. ТПЭ драглайна представлен на рис. 1., ТПЭ мехлопаты – на рис. 2.

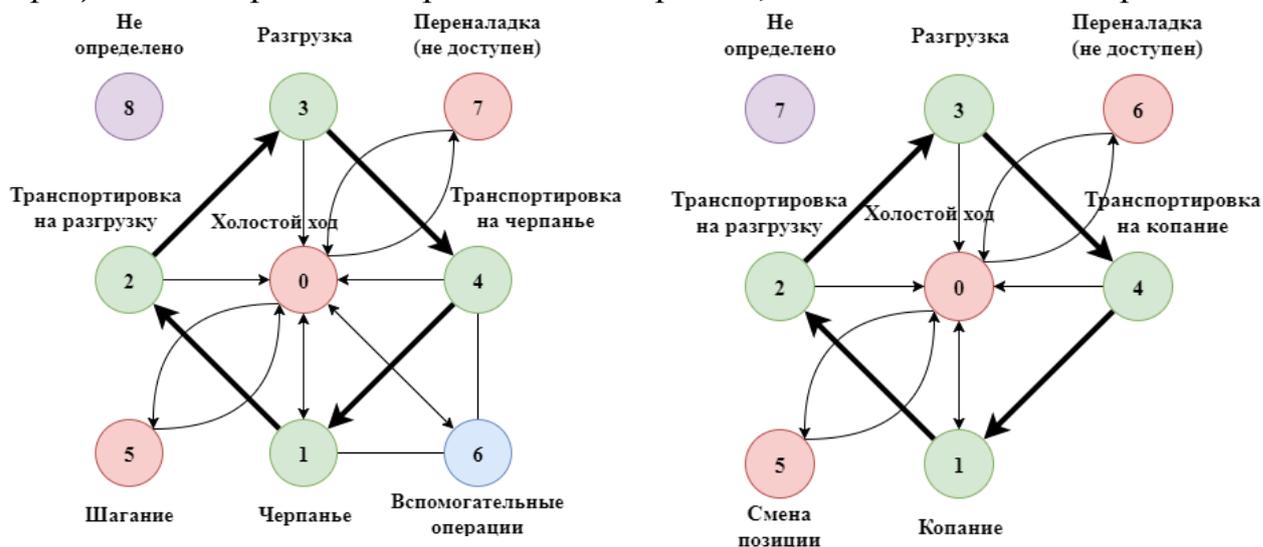


Рисунок 1 – Граф состояний ТПЭ драглайна Рисунок 2 – Граф состояний ТПЭ мехлопаты

Остальные технологические состояния драглайна/мехлопаты подразделяются на плановые и внеплановые простои: *переналадка* и *холостой ход*, *шагание/смена позиции* и *вспомогательные операции*.

Состояние *не определено* является вспомогательным из-за особенностей функционирования АСМП, характеризует нарушение работы АСМП.

Функционирование АСМП осуществляется на основе сбора динамических данных датчиков МГ и МА, пространственных координат с приемника ГНСС, отсчета времени таймера счетно–решающего устройства.

Основные регистрируемые данные АСМП: МГ – угловая скорость платформы ГТМ по оси рысканья – ω_z ; МА – линейные ускорения по осям крена, тангажа и оси Z, перпендикулярной горизонту, $-A_x, A_y, A_z$; текущие пространственные координаты: широта – Θ , долгота – Ξ . На основе данных определяется компоненты кватерниона для ориентации ГТМ – q_1, q_2, q_3, q_4 для разрешения проблемы «шарнирного замка». Кватернион преобразуется в углы Эйлера–Крылова для удобства восприятия.

Разработаны **основные режимы работы АСМП** с учетом конструктивных и технологических особенностей ГТМ: горизонтирование, контроль динамических величин ГТМ, контроль углового поворота платформы ГТМ и

координации работы нескольких ГТМ, контроль наличия объектов в запрещенной бортовой зоне ГТМ.

Оценка эффективности функционирования ГТМ выполняется на основе генеральной совокупности результатов выполнения четырех взаимосвязанных алгоритмов: оценки геометрических и динамических параметров ТПЭ; пространственных параметров ТПЭ; временных параметров ТПЭ; идентификации технологических состояний ГТМ.

В третьей главе описан процесс разработки АСМП функциональных узлов ГТМ на примере АСМП шагающего экскаватора.

Разработана **структура АСМП**, схемы элементов и модулей, взаимодействие элементов системы между собой в соответствии с требованием заказчика. АСМП состоит из трех основных устройств (блоков): основной телеметрический, информационный, навигационный блок (блок ГНСС); четвертое устройство, внешнее по отношению к АСМП, – сервер (выполняется силами заказчика). Структура основного телеметрического блока представлена на рис. 3, структура информационного блока – на рис. 4., структура блока ГНСС АСМП с текстовым протоколом NMEA – на рис. 5, с бинарным протоколом – на рис. 6.

Разработано **аппаратное обеспечение АСМП**.

В состав *основного* телеметрического блока входят следующие основные подсистемы: вычислительно-управляющая, первичных преобразователей (МА и МГ), часов реального времени, памяти, связи по радиоканалу, постоянного тока, питания, связи RS-232 и RS-485 и вспомогательные подсистемы: коммутации питающего напряжения цепей, температурной стабилизации подсистемы МА и МГ, согласования логических уровней вычислительно-управляющей подсистемы.

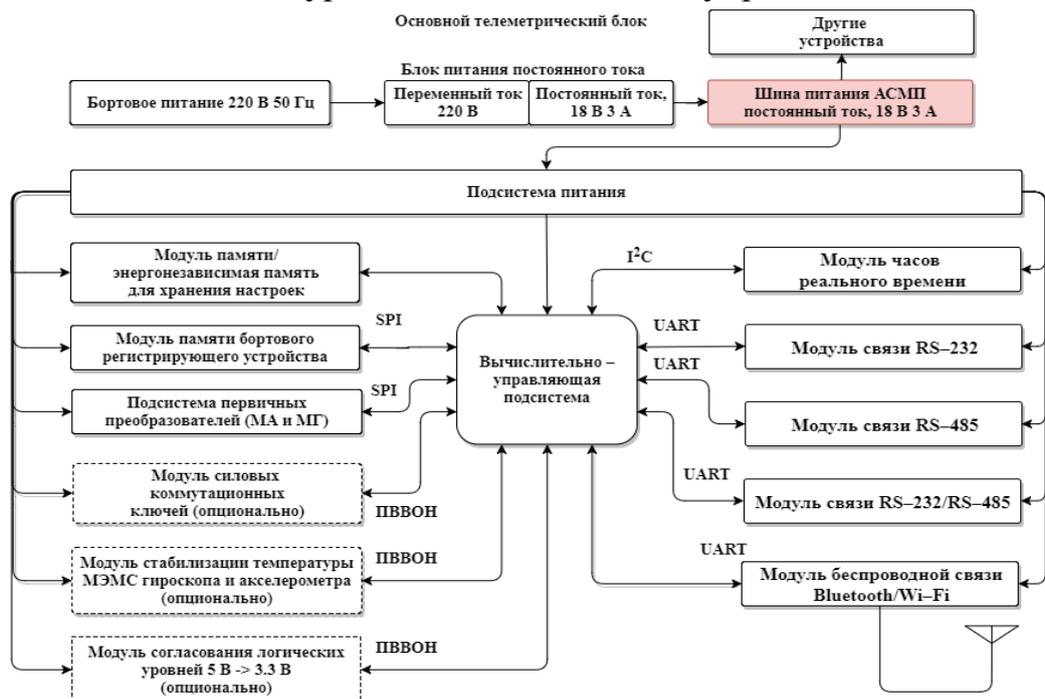


Рисунок 3 – Структура основного телеметрического блока АСМП

В состав *информационного* блока входят следующие основные подсистемы: вычислительная, мобильной связи на основе модуля GSM-связи, памяти, аудиовизуального вывода информации, контроля физического воздействия на информационный блок на основе модуля МА и МГ, ввода информации на основе модуля ввода (клавиатуры), проводной связи с основным блоком, резервной связи с основным блоком питания; вспомогательные подсистемы: радиочастотной идентификации RFID, коммутации питающего напряжения цепей.

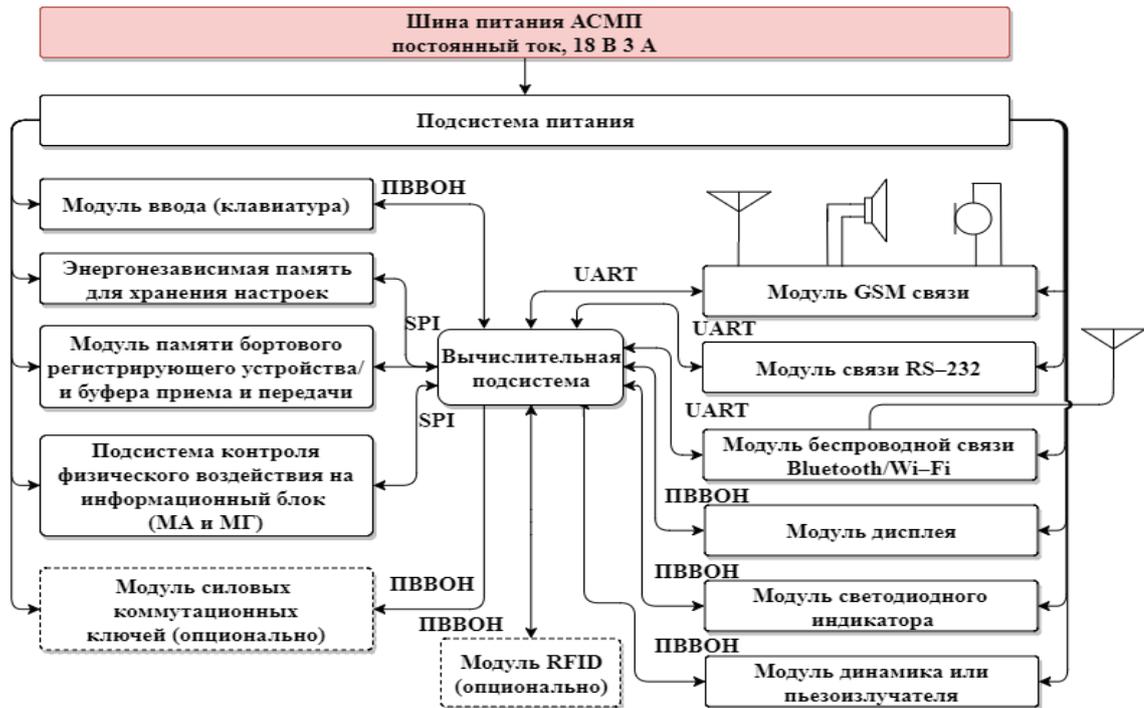


Рисунок 4 – Структура информационного блока системы АСМП

Блок ГНСС состоит из следующих подсистем: спутникового приемника, проводной связи RS-232 или RS-485, питания, вычислительной подсистемы.



Рисунок 5 – Структура блока ГНСС с текстовым протоколом NMEA



Рисунок 6 – Структура блока ГНСС с бинарным протоколом NMEA

В случае использования приемника ГНСС с бинарным протоколом целесообразно использовать полнодуплексный канал связи стандарта RS-485 для связи с телеметрическим блоком.

Взаимодействие блоков АСМП между собой осуществляется по стандарту связи RS-232 и RS-485, связь между основным телеметрическим и информационным блоками дублируется радиоканалом. Схема взаимодействия модулей АСМП и внешних устройств представлена на рис. 7.

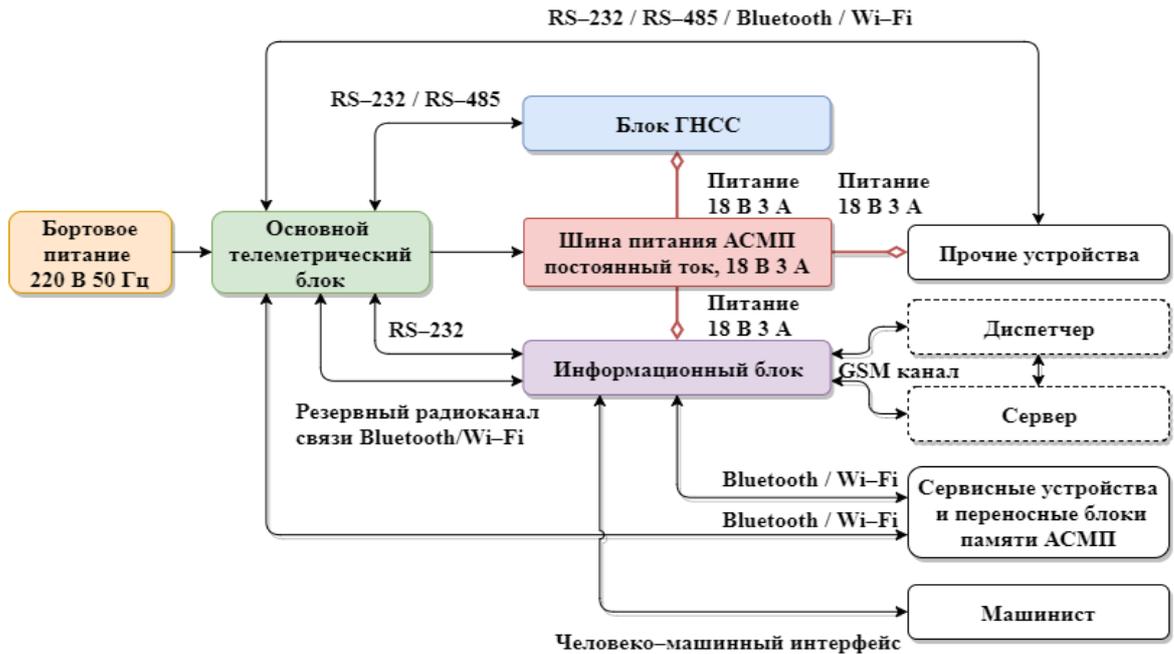


Рисунок 7 – Схема взаимодействия модулей и внешних устройств АСМП

Алгоритмическое и программное обеспечение АСМП представляет собой набор алгоритмов, программ и драйверов, обеспечивающих функционирование АСМП в заданных режимах работы. Главными компонентами алгоритмического обеспечения является комплексирующий фильтр Маджвика и вспомогательные программы для повышения качества его функционирования. Набор вспомогательных программ повышает качество функционирования фильтра и обеспечивает данными алгоритм идентификации технологического состояния ГТМ.

В состав основного алгоритмического обеспечения АСМП входят: рывковый фильтр, алгоритм идентификации состояния платформы ГТМ на основе рывкового фильтра, алгоритм коррекции по нулевой скорости, алгоритм автоподстройки коэффициентов усиления фильтра Маджвика, алгоритм коррекции комплексирующего фильтра Маджвика через ГНСС.

Рывковый фильтр выполняет декомпозицию ускорения, вызванного функционированием ГТМ от воздействия силы тяжести, с целью получения

динамических признаков платформы ГТМ без осуществления оценки направления вектора ускорения свободного падения.

Алгоритм идентификации динамического состояния платформы ГТМ предназначен для определения качественных динамических признаков платформы ГТМ; в нем выполняется *анализ* последовательности и длительности смены состояний рывкового фильтра, *который* должен соответствовать ориентированному технологическому циклу. При этом уточнение динамического состояния выполняется посредством анализа изменения пространственных координат.

Алгоритм коррекции по нулевой скорости выполняет коррекцию угловой скорости в моменты покоя платформы ГТМ.

Алгоритм динамической автоподстройки коэффициента усиления фильтра повышает точность ориентации и устойчивость к вибрациям, улучшает сходимость и достоверность фильтрации во время работы. Коэффициенты усиления – β и ζ определяются на этапе калибровки, с течением времени алгоритм автоматически подстраивает коэффициенты усиления, хранящиеся в энергонезависимой памяти.

Коэффициенты усиления: β характеризует суммарные ошибки МГ, коэффициент усиления ζ характеризует скорость сходимости для нивелирования ошибок измерений МГ, которые не являются нулевыми. Ошибки МГ выражены как величина производного кватерниона. Коэффициенты определяются выражениями: $\beta = \left\| \frac{1}{2} \tilde{q} \otimes \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\omega}_\beta^k & \tilde{\omega}_\beta^m & \tilde{\omega}_\beta^p \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\beta$, $\zeta = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\zeta$, где: ω_β – оценка средней погрешности измерения дрейфа МГ по осям крена, тангажа и рысканья; ω_ζ – расчетная скорость дрейфа МГ в каждой оси; \tilde{q} – базисный кватернион; \otimes – кронекеровское произведение.

Алгоритм имитации магнетометра посредством ГНСС для коррекции фильтра. Алгоритм выполняет преобразование географического азимута, определяемого посредством ГНСС, в характеристики магнитного поля Земли с целью имитации функционирования магнетометра. Имитация магнетометра позволяет фильтру Маджвика выполнять коррекцию дрейфа МГ по оси рысканья, поскольку непосредственное применение магнетометра невозможно из-за возникающих магнитных дисторсий, исходящих от металлических частей конструкции и электрических силовых агрегатов ГТМ.

В четвертой главе приведены результаты испытаний АСМП ГТМ в производственных условиях.

Выполнена оценка характеристик функционирования АСМП экскаваторов серии ЭШ, описывается калибровка МА и МГ, проведен анализ результатов

испытаний АСМП ГТМ в производственных условиях, произведено сравнение разработанной АСМП с аналогами, описаны перспективы развития АСМП.

Оценка характеристик работы АСМП экскаваторов серии ЭШ проводилась в производственных условиях разреза «Кедровский». Оценка точности угловой ориентации АСМП определялась относительно триангуляционной точки и четырех реперных меток, установленных геодезической службой.

Разработанные калибровочные стенды позволили выполнить тестирование и калибровку МА и МГ, оценку точности и отладку фильтров для цифровой обработки сигналов.

В результате испытаний АСМП в производственных условиях разреза «Кедровский» установлено, что абсолютная погрешность угловой ориентации по истечению 60 минут работы АСМП с функционирующим алгоритмом коррекции посредством ГНСС составила не более 5° для гироскопа ADIS16265 и не более 9° для ИИМ SCC2230 относительно триангуляционной точки.

Точность идентификации рабочих циклов обеспечивалась подпрограммой идентификации технологических состояний и алгоритмом коррекции посредством ГНСС. При этом натурная точность идентификации рабочих циклов оценивалась визуально представителями комиссии, находившимися в кабине драглайна ЭШ10/50. В результате корреляционного анализа циклограмм установлено, что АСМП идентифицировала рабочие циклы с точностью до 92 % - в комплектации с МГ ADIS 16265 и до 86 % - в комплектации с МГ SCC2230. Оценка точности идентификации выполнялась сравнением эталонных результатов, зафиксированных наблюдателями, с циклограммой, сгенерированной АСМП. Статистический анализ выполнялся путем расчета оценки среднеквадратичного отклонения циклограмм суммарного/общего количества зафиксированных технологических состояний. Интерфейс программы анализа эффективности работы драглайна ЭШ10/50 представлен на рис. 8.

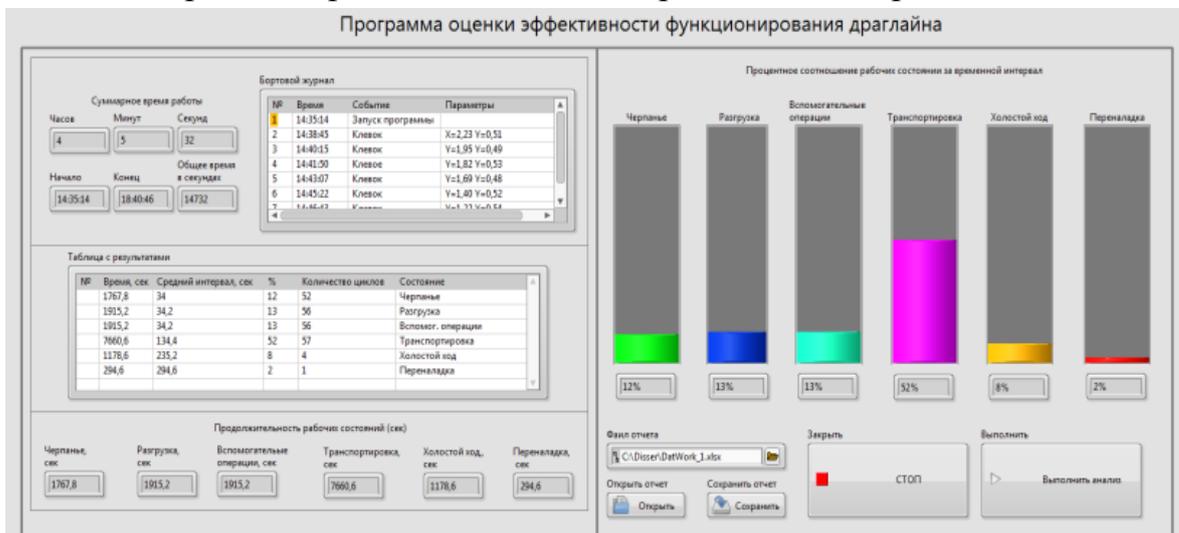


Рисунок 8 – Интерфейс программы анализа эффективности работы драглайна ЭШ10/50

Опытный образец АСМП прошел два испытания: в сентябре 2017 и в марте 2018 года на угольном разрезе «Кедровский».

Общий вид разработанной АСМП представлен на рис. 9. и рис. 10.

На основе измеренных физических величин были рассчитаны параметры ТПЭ (угловые перемещения и угловая ориентация по оси рысканья, угловая ориентация платформы по осям крена и тангажа), рассчитаны: время каждого цикла, время работы и простоя ГТМ, параметры мест черпания и разгрузок, выполнена оценка эффективности работы экскаватора ЭШ10/50.

На рис. 11 представлен графический интерфейс управляющей программы (УП) АСМП, апробированной в сентябре 2017 года, на рис. 12 - усовершенствованный интерфейс УП АСМП, апробированной в марте 2018 года.



Рисунок 9 – Опытный образец АСМП в 2017 году, установленный на экскаваторе ЭШ10/50



Рисунок 10 – Опытный образец АСМП в 2018 году, установленный на экскаваторе ЭШ10/50

Состав программного обеспечения верхнего уровня опытного образца АСМП 2017 года: подпрограмма автокалибровки МГ на основе наложенной вариации Аллана, подпрограмма коррекции по нулевой скорости (первая версия), подпрограмма расчета геометрических, динамических и временных параметров ТПЭ, подпрограмма идентификации технологических состояний ГТМ.

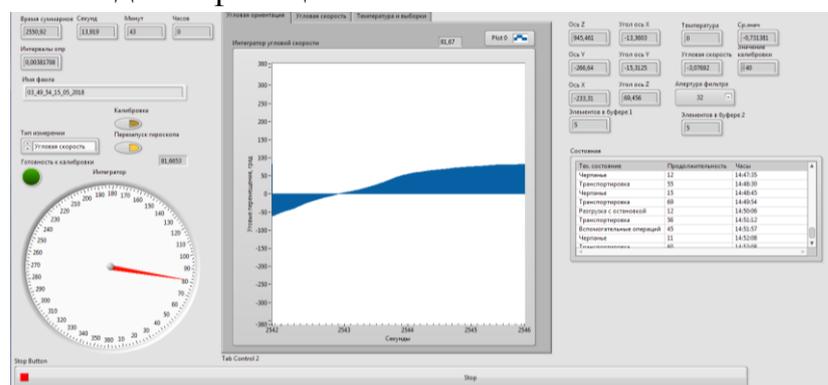


Рисунок 11 – Интерфейс УП АСМП образца 2017 года

Состав программного обеспечения верхнего уровня опытного образца АСМП 2018 года: подпрограмма автокалибровки МГ на основе наложенной

вариации Аллана; подпрограмма фильтрации Маджвика и вспомогательные программы, подпрограмма идентификации технологических состояний ГТМ.

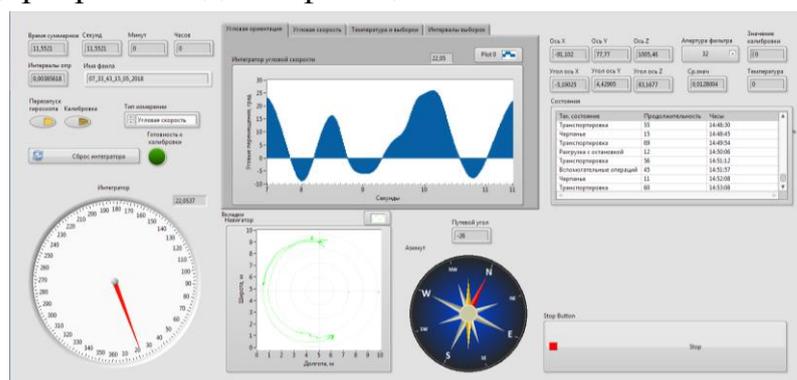


Рисунок 12 – Интерфейс УП АСМП образца 2018 года

Сравнение разработанной АСМП с аналогами выявило следующие различия:

- 1) АСМП унифицирована, функционирует на драглайне и мехлопате;
- 2) АСМП обладает открытой архитектурой, отсутствуют аппаратно-программные ловушки, при модернизации возможно применение отечественной элементной базы, предусмотрено расширение функциональных возможностей;
- 3) АСМП выполняет анализ, идентификацию текущих технологических состояний ГТМ, осуществляет контроль за динамическими и геометрическими характеристиками. АСМП, отслеживает направление стрелы и горизонтальность платформы ГТМ, что позволяет косвенно контролировать последовательность выполнения процедур процесса экскавации.
- 4) АСМП не осуществляет прямую оценку результатов ТПЭ, АСМП выполняет косвенную оценку результатов ТПЭ путем анализа количества выполненных технологических операций и корреляции с пространственными координатами;
- 5) АСМП имеет низкую себестоимость (порядка 150 000 – 180 000 рублей), в зависимости от комплектации, без учета амортизации оборудования и материалов.

Проведенные испытания в производственных условиях показали, что опытный образец АСМП отвечает всем сформулированным в диссертации задачам и требованиям к научной новизне, а в практическом отношении полностью соответствует условиям, определенным в техническом задании: заказчик готов к тестированию установочной партии АСМП.

Модернизация АСМП за счет использования высокоточного навигационного оборудования и алгоритмов машинной классификации и обучения, позволит расширить функциональные возможности ГТМ, повысить качество мониторинга ТПЭ, автоматизирует операции по обеспечению эффективного бесперебойного функционирования ГТМ.

Основные результаты работы и выводы

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения по разработке и исследованию АСМП функциональных элементов ГТМ, имеющие существенное значение для развития угледобывающей промышленности страны. Итогом работы являются следующие **результаты**:

1. Проведен аналитический обзор существующих АСМП функциональных элементов ГТМ; исследованы известные методы и аппаратно–программные решения автоматизированного мониторинга, определены достоинства и недостатки существующих решений и выявлены пути их устранения.

2. Исследованы объекты автоматизированного мониторинга – драглайны ЭШ10/50, ЭШ10/70 и мехлопата – ЭКГ-8И, изучены их конструктивные, геометрические, технологические особенности, режимы работы и эксплуатации. Исследованы типовые технологические операции ГТМ при выполнении ТПЭ. Определены характерные признаки технологических состояний ГТМ с учетом выбранного метода мониторинга, особенности ТПЭ, составлен граф зависимости технологических состояний ГТМ при выполнении ТПЭ.

3. Разработан и апробирован в производственных условиях алгоритм идентификации и учета текущего технологического состояния ГТМ. Алгоритм позволяет выполнять оценку эффективности функционирования ГТМ.

4. Исследована существующая элементная база для АСМП, изучены основные характеристики и рабочие параметры МЭМС-датчиков динамических величин, определены критерии выбора элементной базы. Подобраны МЭМС-датчики для создания АСМП: МА-SCA3100/SCA3300/SCC2230, МГ-ADIS16265/SCC2230 (МЭМС-датчик SCC2230 является комбинированным МА и МГ в одном корпусе), для вспомогательного оборудования AIS328DQ и A3G4250D. Разработаны, изготовлены и протестированы основные электронные модули АСМП, выполнена разработка стендов для калибровки датчиков, осуществлена настройка модулей.

5. Осуществлен сбор данных в лабораторных и производственных условиях для компьютерного моделирования системы сбора и обработки данных на основе компьютерной программы NI LabView 2017, контроллера myRIO и изготовленных электронных модулей. Разработаны и смоделированы имитационные программы цифровых комплексирующих фильтров и сопутствующих сервисных программ. Обработка и исследование данных частично выполнена в программной среде MATLAB R2017b.

6. Разработано и протестировано программное обеспечение АСМП. Выполнено тестирование разработанных программ: сбора и предварительной обработки данных, программы идентификации технологического состояния ГТМ,

комплексированного фильтра Маджвика, сервисных программ для повышения эффективности функционирования фильтра Маджвика.

7. Проведено экспериментальное исследование функционирования АСМП в лабораторных и промышленных условиях. Изучено влияние различных возмущающих воздействий на АСМП, исследованы шумовые характеристики МЭМС-датчиков.

8. Проведена серия производственных испытаний опытного образца АСМП для ГТМ на одном из угольных предприятий УК «Кузбассразрезуголь», проанализирована возможность применения АСМП. Получены акты промышленных испытаний и обоснование целесообразности использования АСМП функциональных элементов ГТМ.

Таким образом, в диссертации изложены научные аспекты разработки и исследования АСМП функциональных элементов ГТМ, которая успешно прошла промышленные испытания в условиях разреза «Кедровский» УК «Кузбассразрезуголь».

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие **выводы:**

1. Предложенный и исследованный новый метод идентификации ТПЭ, анализа рабочих состояний и динамических характеристик ГТМ позволяет оценить качество выполнения ТПЭ.

2. Разработанные и исследованные методы повышения качества функционирования комплексированного фильтра Маджвика, отличающиеся от известных использованием сигналов ГНСС для коррекции работы фильтра, обеспечивают устойчивое функционирование АСМП.

3. Разработанная АСМП отличается от известных решений модульной архитектурой, не критичностью к выбору радиоэлектронной элементной базы, способностью функционировать на любом типе ГТМ. Многоуровневое модульное программное обеспечение позволяет быстро адаптировать АСМП для функционирования в определенных производственных условиях в зависимости от требований заказчика.

Список публикаций автора

Работы, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК России

1. Мещеряков, Я. Е. Автоматизация контроля положения платформы карьерного бурового станка / Я. Е. Мещеряков, А. М. Кориков // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19. - № 3. – С. 94-97.

2. Мещеряков, Я. Е. Автоматизированный мониторинг работы экскаватора в условиях угольного разреза / Я.Е. Мещеряков // Вестник КузГТУ.–2015.–№4.– С.121-125.

3. Мещеряков, Я. Е. Аппаратно–программный комплекс позиционирования в пространстве функциональных элементов горных машин/М. Ю. Дрыгин, Н. П. Курышкин, Я. Е. Мещеряков, О. В. Любимов // Вестник КузГТУ. – 2014.– №5.- С. 28-31.

Работы, зарегистрированные в международной базе научного цитирования Scopus

4. Mescheryakov, Y. Monitoring Positioning Accuracy of the Basic Functional Units of Technological Machines / Y. Mescheryakov, A. Korikov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol 770. – P. 612-616. <https://www.scientific.net/AMM.770.612>

5. Mescheryakov, Y. Automated system of monitoring and positioning of functional units of mining technological machines for coal-mining enterprises / Y. Mescheryakov, R. Mescheryakov // МАТЕС Web of Conferences. – 2018. – Volume 161. P 5.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/20181610301>

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617216. Автоматизированная система наблюдения за положением рабочих элементов горных машин / Курышкин Н. П., Любимов А. В., Мещеряков Я. Е., Обоянский П. М. – Заявка №2014614919. Дата поступления 20 августа 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2014 г.

Публикации в других изданиях:

7. Мещеряков, Я. Е. Нивелирование дрейфа МЭМС-гироскопа /Я. Е. Мещеряков // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно–практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр. - 2017. - С. 250.

8. Мещеряков, Я. Е. Автоматизированное управление карьерным буровым станком вертикального бурения / Я. Е. Мещеряков, А. М. Кориков // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири 22–я Международная научно–практическая конференция «Сибресурс–22–2016»: доклады (материалы). – Томск: Изд–во «В–Спектр». – 2016. - С. 172.

9. Мещеряков, Я. Е. Мониторинг, контроль и автоматическое управление положением платформ горнодобывающих технологических машин / Я. Е. Мещеряков, А. М. Кориков // Информационно–измерительная техника и технологии: материалы VII научно–практической конференции. – Томск: Изд–во Томского государственного университета. - 2016. – С. 710.

10. Мещеряков, Я. Е. Аппаратно–программный комплекс для мониторинга рабочих циклов шагающих экскаваторов на угольных разрезах Кузбасса / Я. Е. Мещеряков, А.М. Кориков, Н.П. Курышкин // Системы автоматизации и образования, науке и производстве: Труды X Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. редакцией С. М. Кулакова, Л. П. Мышляева. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ. - 2015.

11. Мещеряков, Я. Е., Система автоматизированного учета рабочих циклов платформ экскаваторов на угледобывающих предприятиях Кузбасса / Я. Е. Мещеряков, А. М. Кориков // Научная сессия ТУСУР–2015: Материалы Всероссийской научно-

технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск: Издательство «В-Спектр». - 2015. – Ч. 3. – С. 169-172.

12. Мещеряков, Я. Е. Мониторинг точности позиционирования основных функциональных узлов технологических машин / Я. Е. Мещеряков, А. М. Корилов // Актуальные проблемы современного машиностроения: Сб. трудов Международной конференция, Юргинский технологический институт. – Томск: Издательство Том. политехн. ун-та. – 2014. - С. 38-42.

13. Mescheryakov, Y. The automatic system for positioning of the functional elements of the mining machines / Y. Mescheryakov, N. Kurishkin, O. Lyubimov, P. Oboynsky, K. Ponomaryov, K. Mametyev // Proceedings in Electronic International Interdisciplinary Conference. The 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference. – 2013. – P. 401-403. ISBN 978-80-554-0762-3

14. Мещеряков, Я. Е. Разработка аппаратно-программного комплекса позиционирования функциональных элементов горных машин / Я. Е. Мещеряков, П. М. Обоянский // Сборник материалов VI Всероссийской 59 научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая», – Кемерово, 22–25 апреля 2014 г. – С. 122–125.

15. Мещеряков, Я. Е. Прототип системы автоматической телеметрии и позиционирования в пространстве элементов буровых машин / Я. Е. Мещеряков, П. М. Обоянский, Е. А. Маметьев, К. Д. Пономарев // Сборник материалов V Всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая», – Кемерово, 16–19 апреля 2013 г. – С. 183-186.

16. Мещеряков, Я. Е. Автоматизированная система позиционирования буровых станков / Я. Е. Мещеряков, П. М. Обоянский // Научная сессия ТУСУР-2013: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск: Издательство: «В-Спектр». - 2013. Ч. 4. – С. 85-88.

17. Мещеряков, Я. Е. Прототип системы автоматической телеметрии и позиционирования исполнительных органов горных машин / Я. Е. Мещеряков, П. М. Обоянский // Современные техника и технологии; сборник трудов XIX Междунар. Научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ. - 2013. – Т. 2 – С. 284-285.