

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

*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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор Корицов А.М.

Томск – 2018

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЗОР РЫНКА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ .....	13
1.1 Обзор рынка систем автоматизированного мониторинга и позиционирования функциональных узлов технологических машин .....	13
1.2 Анализ алгоритмов комплексирования .....	27
1.3 Методы анализа стабильности МЭМС-датчиков динамических величин .....	38
1.4 МЭМС-датчики ускорения и угловой скорости: анализ рынка МЭМС, обоснование выбора датчиков динамических величин .....	41
1.5 Обоснование выбора МЭМС-датчиков для построения ИИМ .....	46
1.6 Выводы по первой главе.....	48
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСКАВАЦИИ И ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСМП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГТМ.....	50
2.1 Технологический процесс экскавации горной массы .....	50
2.2 Графическое представление ТПЭ ГТМ .....	60
2.3 Основные режимы работы АСМП.....	62
2.4 Оценка эффективности работы ГТМ .....	74
2.5 Выводы по второй главе.....	88
3 РАЗРАБОТКА АСМП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ПРИМЕРЕ АСМП ШАГАЮЩЕГО ЭКСКАВАТОРА .....	89
3.1 Разработка автоматизированной системы сбора и обработки данных для компьютерной симуляции комплексирующих фильтров .....	89
3.2 Структура АСМП .....	90
3.3 Аппаратное обеспечение АСМП .....	99
3.4 Программное обеспечение АСМП .....	104

3.5 Выводы по третьей главе.....	124
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ АСМП ГТМ .....	126
4.1 Оценка характеристик работы АСМП экскаватора серии ЭШ.....	126
4.2. Проведение испытаний АСМП в производственных условиях.....	138
4.3. Сравнение разработанной АСМП с аналогами.....	146
4.4. Перспективы развития АСМП и выводы по четвертой главе .....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты промышленных испытаний.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Техническое задание на разработку и внедрение системы автоматизации процессов мониторинга и позиционирования функциональных узлов технологических машин (титальный лист, лист согласования) .....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Обоснование целесообразности использования автоматизированной системы мониторинга функциональных элементов горных машин .....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Основные характеристики МГ, характеристики существующих МЭМС-датчиков динамических величин.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Разработка автоматизированной системы сбора и обработки данных для симуляции комплексирующего фильтра Маджвика .....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акты внедрения .....	194

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В угледобывающей отрасли широко используется добыча угля открытым способом, который имеет очевидные преимущества по сравнению с подземным и отличается более высокой производительностью, низкой себестоимостью добычи и безопасностью проведения горных работ.

Перспектива последовательного роста добычи угля открытым способом в ближайшие годы должна быть обеспечена, кроме ввода новых мощностей, повышением производительности труда и, следовательно, снижением себестоимости добычи угля [1]. Этому результата можно добиться двумя путями: во-первых, значительными инвестициями в покупку современной техники (экскаваторов, бульдозеров, карьерных самосвалов) и, во-вторых, снижением простоев основного технологического оборудования [2] за счёт внедрения новых прогрессивных форм организации его работы и ремонта [3].

Второй путь в настоящее время является наиболее реальным. Основной показатель, характеризующий эффективность открытых горных работ - это производительность основных технологических машин угольных разрезов – экскаваторов различных типов.

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, для раскрытия всего потенциала системы требуется

дорогостоящее дополнительное оборудование, кроме этого, информация о выполнении рабочих циклов и динамических характеристик ГТМ является в зарубежных системах второстепенной 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 проблемой является разработка автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) функциональных элементов ГТМ для позиционирования, идентификации рабочих циклов, оценки параметров технологического процесса экскавации (ТПЭ). Это достигается путем измерения динамических характеристик в режиме реального времени и обработки результатов с помощью специализированного программного обеспечения. В отличие от существующих технических решений, элементы АСМП унифицированы, система не требует подключения к бортовой электронике и системе управления ГТМ.

Таким образом, вопросы разработки и анализа автоматизированных систем мониторинга работы ГТМ представляют существенный интерес как при проведении теоретических и экспериментальных исследований, так и при создании средств автоматизации и электронных устройств, которые могут измерять и контролировать работу ГТМ, тем самым повышая качество работы горной техники.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме автоматизированного контроля функционирования ГТМ, созданию комплексных систем автоматизации и оптимальным режимам 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. [4–10].

Известны научные работы в области интеллектуального и оптимального управления драглайнами зарубежных исследователей: Halatchev R.A., Knight P.F. [11]; Hall A.S. [12]; Westcott P. [13]; Bricker M.L., Key J.R. [14]; Chugh Y.P., Ehie I. [15]; Denby B., Schofield D. [16]; Singhal R.K, Naidu H.G., Singh S.P. [17]; Hrebar J., Henry J. Cook jr [18]; Jones B.T [19]; Gupta S. [20]; Humphrey J.D. [21].

Разработкой и производством различных систем автоматизированного мониторинга занимаются следующие зарубежные компании: MineWare [22, 23, 24], Topcon [25, 26, 27], Trimble [28], Prolec [29, 30], Leica Geosystems [31], Moba [32, 33], Белгидросила [34]. Одни из самых 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.

Исследования выполнялись на следующих ГТМ: шагающие экскаваторы (драглайны) серии ЭШ (ЭШ 10/70, ЭШ 10/50 и подобные); одноковшовые электрические гусеничные экскаваторы (мехлопаты) ЭКГ (ЭКГ–5А, ЭКГ–8И и подобные) и карьерные буровые станки (СБШ–250) [35-38].

**Предмет исследования** – процесс мониторинга и позиционирования функциональных элементов ГТМ во время технологического процесса экскавации горной массы.

**Цель диссертационной работы** – исследование и разработка автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) основных функциональных элементов горных технологических машин,

разработка и исследование алгоритмического, программного и технического обеспечения АСМП.

В соответствии с поставленной целью решаются следующие **задачи**:

1. Исследовать известные методы автоматизированного мониторинга и позиционирования, определить их особенности, достоинства и недостатки, выявить пути устранения недостатков.

2. Исследовать объекты автоматизированного мониторинга – драглайн ЭШ10/50 или ЭШ10/70 и мехлопату ЭКГ–8И, изучить 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 горных технологических машин на угольных разрезах компании «Кузбассразрезуголь», произвести серию производственных испытаний АСМП.

**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.

**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, идентификация динамического состояния платформы ГТМ, коррекция по нулевой скорости, автоподстройка коэффициентов усиления фильтра Маджвика, коррекция 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 исследования.** 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 гироскопов (МГ), оценку точности и отладку фильтров для цифровой обработки сигналов.

2. Предложенный метод коррекции комплексующего фильтра Маджвика, предназначенный для стабилизации и ориентации объектов, может быть применен 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.

**Значение полученных результатов исследования для практики.**  
Внедрение АСМП в технологический процесс экскавации позволяет:

1. Выполнять автоматизированный контроль и оценку углов ориентации платформы ГТМ, предотвратить запрещенные (аварийные) режимы эксплуатации ГТМ, производить более точный расчет ремонтного цикла с учетом режимов функционирования ГТМ.

2. Увеличить наработку мото-часов отдельных элементов и узлов механизмов за счет постоянного мониторинга угловой ориентации платформы ГТМ, сократить время технологического обслуживания, тем самым обеспечить суммарную годовую экономию временных фондов.

3. Автоматически фиксировать и передавать на сервер диспетчера по системе сотовой связи информацию о числе рабочих циклов экскаватора, времени его простоя и эффективной работы.

4. Обучать машинистов ГТМ посредством активного информирования о ходе ТПЭ горной массы и демонстрации рабочего опыта передовых бригад.

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», организованного Департаментом радиоэлектронной промышленности Минпромторга России. Разработка

аппаратного обеспечения проводилась при поддержке фирм National Instruments и Murata, УК «Кузбассразрезуголь» (данное научное исследование является контрактной разработкой по заказу подразделения концерна «УГМК» для УК «Кузбассразрезуголь»). Техническое задание на разработку и внедрение системы автоматизации процессов мониторинга и позиционирования функциональных узлов технологических машин (титульный лист, лист согласования) от компаний УК «Кузбассразрезуголь» приведено в приложении В.

Обоснование о целесообразности использования АСМП функциональных элементов ГТМ представлено в приложении Г.

### **Степень достоверности результатов исследования.**

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, выносимые на защиту научно-квалификационной работы (диссертации).**

1. Метод идентификации ТПЭ обеспечивает определение динамических, геометрических, пространственных и временных параметров рабочего состояния и оценку эффективности работы ГТМ.

*Соответствует пункту 6 паспорта специальности: 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: 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: Автоматизация контроля и испытаний.*

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на 11 Всероссийских и Международных конференциях, семинарах и интернет-конференциях:

1. ER(ZR)-2018: The 13th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings", St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, 2018 y.

2. XIII Международная научно–практическая конференция «Электронные системы и средства управления – 2017», г. Томск, 2017 г.

3. Всероссийский инновационный конкурс на базе Новосибирского государственного университета, 8–10 ноября, г. Новосибирск, 2017 г.

4. XVI Международная научно–практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири «СИБРЕСУРС 2016», г. Новокузнецк, 2016 г.

5. VII Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием, г. Томск, 2016 г.

6. X Всероссийская научно-практическая конференция AS`2015 «Системы автоматизации в образования, науке и производстве», г. Новокузнецк, 2016 г.

7. Всероссийская научно–практическая конференция «Научная сессия ТУСУРа–2015» г. Томск, 2015 г.

8. Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы современного машиностроения", г. Юрга, 2015 г.

9. Современные техника и технологии: XIX Международная научно–практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 2013 г.

10. Автор опубликовал работы на Международных интернет–конференциях «ICTIC–2013» и «EPC–2013» в г. Жилине (Словакия) (март и сентябрь, 2013г.).

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры АСУ ТУСУР в 2014 – 2018 гг.

Отдельные результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО ТУСУР и ФГБОУ ВО КузГТУ.

Результаты третьей и четвертой главы диссертации использованы при проведении занятий в ФГБОУ ВО ТУСУР по дисциплине «Методы планирования эксперимента» для магистрантов направления 09.04.01 при выполнении практических занятий, реализации двух проектов группового проектного обучения на кафедре БИС.

Результаты применения МЭМС-датчиков использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО КузГТУ при подготовке магистров по направлению 15.04.04 по дисциплине «Технические средства автоматизации».

Акты внедрения приведены в приложении Ж.

**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.

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.

# **1 ОБЗОР РЫНКА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ**

## **1.1 Обзор рынка систем автоматизированного мониторинга и позиционирования функциональных узлов технологических машин**

Современные технологии разработки систем автоматизации процессов мониторинга и позиционирования функциональных узлов ГТМ позволяют улучшить технологические показатели и качество проведения ТПЭ горной массы.

Анализ рынка современных аппаратно–программных средств АСМП показал, что на рынке строительной и ресурсодобывающей техники представлены три основных типа АСМП, используемых в большей степени на строительных экскаваторах: одномерные (1D), двумерные (2D), трехмерные (3D).

К первому типу АСМП относятся простейшие одномерные лазерные системы, позволяющие измерять текущее положение ковша и уклон относительно опорного лазерного нивелира, являющегося исходной точкой отсчета, по которому задаются начальные значения (нулевые отметки). Такая АСМП не является полноценной системой нивелирования, но позволяет значительно повысить точность и эффективность производства работ, не требуя при этом никаких специальных навыков и знаний от оператора.

Ко второму типу АСМП относятся двумерные системы, не требующие использования лазерного нивелира в прямой зоне видимости и, в отличие от простых лазерных систем, являются более гибкими, эксплуатируются при создании глубоких котлованов или дноуглубительных работах с затрудненным визуальным наблюдением рабочего органа – ковша.

К третьему типу АСМП относятся сложные компьютеризированные системы, составляющие трехмерную модель рабочего участка и позволяющие выполнять контроль технологического процесса по многим показателям. Все действия, выполняемые при технологическом процессе экскавации, сохраняются

в трехмерной модели в бортовом компьютере. В качестве базового ориентира используется трехмерная модель рабочего участка.

При анализе рынка существующих систем автоматизированного контроля для строительной техники были выделены системы, представленные в табл. 1.1

Таблица 1.1 – Существующие АСМП для экскаваторов

Производитель	Страна производитель	Система	Класс системы	Точность установки ковша
Topcon	Япония	Easy Control	1D	2-4 см
		X-22	2D	2-4 см
		X-62*	2D	2-4 см
		X-32	2D	2-5 см
		X-33	3D	2-4 см
		X-63/X-63i	3D	2-4 см
Trimble	США	GCS 600	2D	2–3 см
		GCS 900	3D	2-4 см
Prolec	Великобритания	Level X	1D	2-4 см
		Digmaster X	2D/3D	2-4 см
		Digmaster Pro	2D/3D	2-4 см
		Digmaster PRO + RTK-GPS	3D	1-3 см
		PcX-3D	3D	1-3 см
Leica Geosystems	Швейцария	iCON iXE3	3D	1 см
Moba	Германия	Xsite Easy	1D	1-3 см
		Xsite Pro	2D	1-3 см
		Xsite Pro Advanced	3D	1-3 см

Рассмотрим некоторые типы систем контроля и мониторинга ГТМ (экскаваторов), их краткую характеристику, комплектацию, функциональные возможности, достоинства и недостатки.

### ***Одномерные системы для экскаваторов***

Существующие одномерные системы контроля: Prolec – Level X, Topcon – Easy Control.

**Принцип работы** одномерных систем основан на фиксации прохождения луча лазера через регистрирующий элемент, устанавливаемый на рукояти ковша.

К достоинствам одномерных лазерных систем следует отнести невысокую стоимость, простоту в эксплуатации, исключается обязательное присутствие мастера на участке.

Недостатки одномерных систем: контроль осуществляется только по глубине, высоте и уклону; требуется установка лазерного нивелира или тахеометра в зоне прямой видимости, не обеспечивается контроль выполнения ТПЭ. *Одномерная система фирмы Prolec – Level X* – это простейшая лазерная система, работающая в режиме цифрового индикатора уровня экскавации и уклона. Система «Level X» состоит из: лазерного нивелира, приемника с магнитным креплением на рукоять экскаватора и приборной панели, изображенной на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Система Prolec – Level X

Система дает возможность машинисту самостоятельно контролировать ход выполнения работ при экскавации грунта, тем самым, исключая необходимость корректировки от геодезиста или мастера.

Система Prolec – Level X позволяет контролировать глубину экскавации грунта; отображает глубину до проектной отметки и рабочий уклон; обеспечивать работу в условиях ограниченной видимости рабочего органа (в воде и глубоких траншеях); использовать экскаватор в качестве измерительного инструмента; позиционировать с точностью около 5 см по высоте и 0,1% в уклоне; функционировать в одном из режимов: глубина, глубина и уклон, профиль, режим измерения, режим горизонтирования экскаватора.

Система применяется при разработке грунта, на начальных этапах строительства дорог, при рытье котлованов фундаментов, сооружении траншей, водных каналов, создании и формировании откосов.

*Одномерная система Topcon – Easy Control* – это лазерная система, функционирующая в режиме цифрового высотомера ковша экскаватора в пространстве относительно лазерного нивелира.

Система состоит из: лазерного нивелира, лазерного приемника LS-B10W, дисплея – индикатора RD-100W, крепления Holder-6, вторичных перезаряжаемых источников питания, зарядного устройства. Коммуникация между дисплеем – индикатором и лазерным приемником осуществляется по радиоканалу. Компоновка и места установки элементов системы приведены на рис. 1.2.

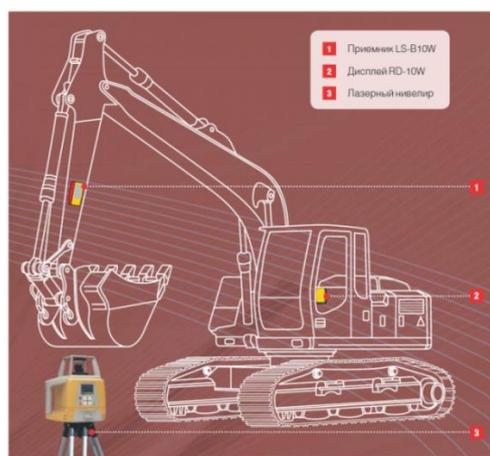


Рисунок 1.2. – Компоновка системы Topcon Easy Control

Применение лазерных системы нивелирования упрощает выполнение «работ нулевого цикла». Работы нулевого цикла – работы для подготовки строительной площадки на методиках переработки грунта и устройства земляных сооружений различных типов и форм.

### ***Двумерные системы для экскаваторов***

Проведя исследование существующих двумерных систем, мы пришли к выводу, что для двумерных систем не требуется нахождение лазерного нивелира в прямой зоне видимости и, в отличие от простых лазерных систем, являются более гибкими, используются для рытья глубоких котлованов или дноуглубительных работ с затрудненным визуальным наблюдением рабочего органа – ковша.

Двумерные системы состоят из угловых датчиков, панели управления, имеют возможность оснащения дополнительным оборудованием: электронным компасом (магнетометром), лазерным приемником и лазерным нивелиром.

**Принцип работы** двумерных систем основан на использовании инерциальных датчиков: акселерометров и датчиков угловой скорости (гироскопов), которые устанавливаются на всех элементах экскаватора (стрела, ковш, рукоять, корпус) для определения ориентации ковша в пространстве.

Для повышения точности работы используется дополнительная корректировка по лазерному нивелиру или глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Функционирование двумерных систем происходит относительно опорных поверхностей: лазерных плоскостей или монтажных струн для закрепления на местности необходимых отметок и уровней для проектных данных глубины копания, уклона и профиля.

К достоинствам двумерных систем относятся: простота в эксплуатации, расширение возможности строительной техники, возможность точной экскавации, невысокая стоимость, соответствие формируемых поверхностей опорным поверхностям.

К недостаткам двумерных систем следует отнести невозможность установки опорных поверхностей произвольных форм.

Существуют следующие двумерные системы контроля: Topcon X-22, Topcon X-62, Topcon X-32, Trimble GCS 600, Prolec Digmaster X, Moba Xsite Easy.

*Беспроводная двумерная система контроля Topcon X-22* состоит из четырех угловых датчиков TS-1, вычислительного блока GX-60, дополнительно может комплектоваться лазерным приемником LS-B10W и компасом.

Применение дополнительных модулей (лазерного приемника) даст повышенную точность определения положения стрелы экскаватора, а применение компаса даст дополнительную точность определения угла поворота экскаватора по оси рысканья в условиях ограниченной видимости. Датчик наклона и компас

устанавливается на корпусе экскаватора, что позволяет выполнять угловую ориентацию и определять наклон платформы по крену и тангажу.

Определение ориентации ковша выполняется от угловых датчиков, установленных на корпусе, ковше, стреле и рукояти. Определение текущей ориентации выполняется относительно исходной эталонной позиции, где смещение вычисляется с помощью угловых датчиков.

Датчики и вычислительный блок соединены между собой по радиоканалу, питание осуществляется от аккумуляторов. Полный цикл зарядки длительностью в 8 часов обеспечивает работу датчиков на протяжении 120 часов.

Двумерная система контроля Topcon X-62 представляет собой проводную вариацию системы контроля Topcon X-22. Отличается от системы X-22 способом подключения датчиков к вычислительному блоку (по стандарту промышленной сети CAN (Controller Area Network)). Применение промышленной сети увеличивает надежность и позволяет эксплуатировать систему в более сложных условиях (вода или жесткий грунт).

Возможно применение дополнительных датчиков наклона второй стрелы и ковша. Во время эксплуатации системы в жестких условиях возможно применение усиленной защиты для датчиков.

Состав и компоновка системы X-62 аналогична системе X-22 и представлена на рис. 1.3.

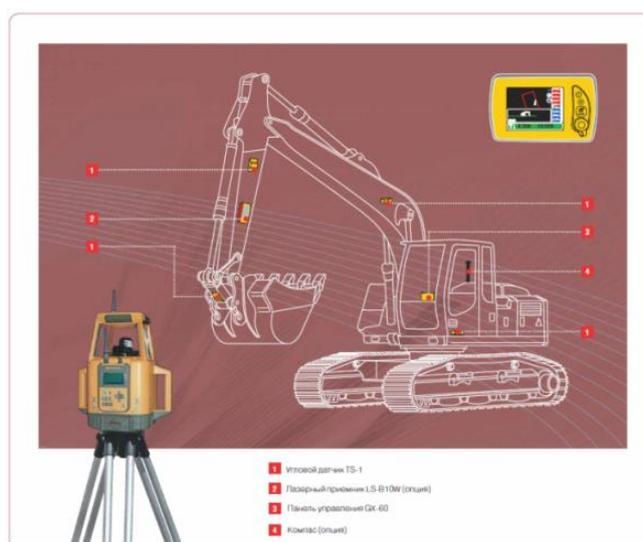


Рисунок 1.3 – Состав и компоновка систем X-22 и X-62

Система X-62 может быть легко модернизирована до полноценной трехмерной системы контроля благодаря унифицированному вычислительному блоку. Система используется для решения общих экскаваторных задач от формирования определенного рельефа до горизонтальной экскавации.

Двумерная система контроля Topcon X-32 состоит из четырех угловых датчиков TS-i3, коммуникационного узла MC-i3, сенсорного вычислительного блока GX-30, выносным цифровым компасом, может дополнительно комплектоваться лазерным приемником LS-B10W. Состав и схема установки системы Topcon X-32 представлена на рис. 1.4.

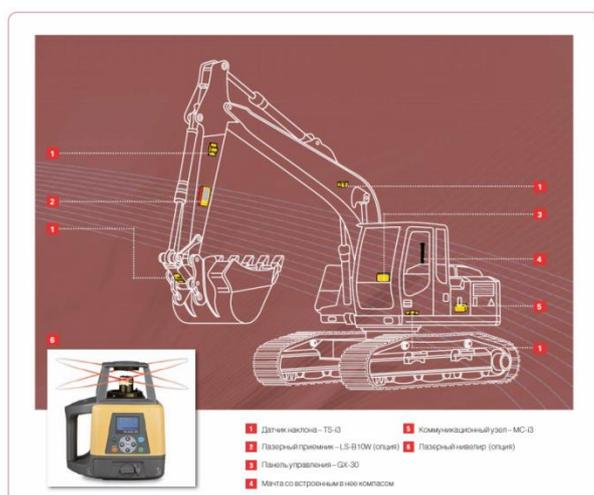


Рисунок 1.4 – Состав и схема установки системы Topcon X-32



Рисунок 1.5 – Сенсорный вычислительный блок GX-30

Система базируется на вычислительном блоке GX-30 под управлением операционной системы Windows CE, которая используется в трехмерных системах контроля. Вычислительный блок оснащен цветным сенсорным дисплеем и позволяет задавать необходимый профиль и уклон непосредственно в компьютере. Вычислительный блок GX-40 представлен на рис. 1.5.

Угловые датчики позволяют измерять углы между стрелой, кабиной, рукоятью и ковшом экскаватора, возможен контроль уклона ковша. Компас позволяет выполнить угловую ориентацию платформы экскаватора.

К достоинствам системы можно отнести то, что она позволяет машинисту контролировать положение платформы экскаватора и ковша во время всего технологического процесса экскавации, позволяет достичь требуемого уровня с первого раза, исключает излишнюю выемку грунта, упрощает формирование горизонтальных и вертикальных поверхностей.

*Двумерная система контроля Trimble GCS 600* состоит из трех одноосевых угловых датчиков AS450, двухосевого углового датчика наклона платформы AS460 и вычислительного модуля CB430 или CB450. Функционал системы может быть расширен благодаря применению дополнительного оборудования: датчика поворота–наклона ковша AS455, лазерного приемника LC450 и передатчика LL400, двумя дополнительными угловыми датчиками AS450 (рукоять и наклон ковша), датчика направления HS410, светодиодной индикаторной панели LB400 и GPS/ГЛОНАСС приемника MS990 или MT900.

Начальная высотная привязка выполняется высотными маркерами или с помощью лазерного нивелира, если на экскаваторе установлен лазерный приемник.

Определение текущей ориентации ковша выполняется от угловых датчиков, установленных на корпусе, ковше, стреле и рукояти относительно начальной высотной привязки.

Система контроля Trimble GCS 600 позволяет: отображать глубину до проектной отметки и рабочий уклон (по осям крена и тангажа); выполнять экскавацию грунта в условиях ограниченной видимости (вода и глубокие траншеи); применять экскаватор в качестве измерительного инструмента; функционировать в режимах (глубина, глубина и уклон, профиль, режим измерения, горизонтирование экскаватора).

Система ориентирована для контроля массовой выемки грунта и контроля ориентации функциональных элементов технологической машины, может быть использована при работах нулевого цикла.

Система может быть модернизирована до трехмерной системы добавлением GPS приемника и радиомодема. После модернизации появится возможность контроля положения отвала относительно 3D цифровой модели проекта.

Система может устанавливаться на промышленные гидравлические экскаваторы массой от 10 до 70 тонн, **установка на драглайны и мехлопаты невозможна** из-за конструктивных особенностей и ограничений, связанных с длиной кабеля, максимальная длина кабеля не более 9 м (поскольку система сделана по агрегатному принципу, удлинение кабеля невозможно). В драглайнах ковш подвешан на канатах и не имеет жестких элементов, на которые могут быть установлены датчики системы. Мехлопаты обладают значительными габаритными показателями, которые превышают максимально возможную длину кабеля.

*Двумерная система контроля Prolec Digmaster X* состоит из трех трехосевых угловых датчиков AS7, лазерного приемника, панели управления и GPS компаса с акселерометром для точного учета поворота платформы.

Начальная высотная привязка, определение текущей ориентации, установка датчиков выполняется аналогичными методами описанными выше.

Система позволяет отображать глубину, уклон, «мертвую зону», сформированный профиль, нивелировать платформу экскаватора.

Возможны дополнительные режимы работы: защита от опрокидывания и автоматическое отключение гидравлики при попадании в «мертвую зону». Режим «мертвая зона» информирует о нахождении ковша в запрещенной зоне для предотвращения самоподкопа и разрушения коммуникации.

*Двумерная система контроля Moba Xsite Easy* начального уровня состоит из трех угловых датчиков (ковш, рукоять, стрела), углового датчика и датчика угла поворота шасси экскаватора, вычислительного блока.

Функционал системы может быть увеличен дополнительным оборудованием: лазерным приемником, датчиком поворота, двойным датчиком стрелы ковша, светодиодным табло. Вычислительный блок и светодиодное табло представлено на рис. 1.6.

Функционал системы позволяет измерять глубину, расстояние, уклон ковша; проводить экскавацию грунта в условиях ограниченной видимости (вода, туман); предупреждать о достижении заданной высоты; при наличии датчика поворота ковша – поперечный уклон ковша.



Рисунок 1.6 – Вычислительный блок Xsite Easy и светодиодное табло

### *Трехмерные системы контроля*

К трехмерным системам относятся сложные компьютеризированные системы, позволяющие выполнять контроль технологического процесса по многим показателям. Все действия, выполняемые при технологическом процессе экскавации, сохраняются в бортовом компьютере. Данные системы позволяют значительно повысить качество проведения земельных работ и эффективность работы техники, поскольку создают трехмерную модель рабочего участка, на которой в режиме реального времени отображаются результаты экскавации, что позволяет легко оценить качество проведения работ.

Трехмерные системы состоят из комплекта инерциальных датчиков (датчики угла), ГНСС, системы связи по радиоканалу и мобильной сети (GSM) с доступом в интернет, магнетометра, системы управления (бортовой компьютер) с сенсорным дисплеем, системой контроля входа ковша в запрещенную зону. Системы могут быть дополнены следующими аппаратно–программными элементами: угловыми датчиками, блокировкой гидравлики при входе в запрещенную зону, защитой от опрокидывания, подсистемой контроля давления в гидросистеме.

**Принцип работы** трехмерной АСМП основан на определении координат экскаватора с помощью ГНСС или электронного тахеометра. Координаты ковша получаются введением поправок, полученных с угловых датчиков, установленных на различных элементах конструкции (стрела, рукоять, платформа).

Трехмерные системы для дополнительной корректировки используют лазерный нивелир или электронный тахеометр.

При позиционировании используется режим измерений RTK (*англ.* Real time kinematic – кинематика реального времени), позволяющий посредством передачи дифференциальных поправок получать координаты в реальном времени с точностью до 20 мм.

Для передачи поправок используется радио или GSM (Global System for Mobile Communications) канал связи, для наиболее точного определения координат используются методы LPS [39] или mmGPS [40]. Все изменения в ходе ТП транслируются на панель управления в режиме реального времени.

К числу достоинств трехмерных систем следует отнести гибкое расширение функциональных возможностей строительной техники, точной экскавации, обеспечение машиниста экскаватора и оператора достоверной информацией, защита персонала и оборудования. ГНСС в сочетании с угловыми датчиками позволяет с высокой точностью определять абсолютные пространственные координаты ковша, электронный магнетометр позволяет определить поворот корпуса экскаватора в пространстве без лазерного нивелира.

К числу недостатков трехмерных систем следует отнести очень высокую стоимость и наличие дополнительного оборудования для использования всего потенциала системы.

Существуют следующие трехмерные системы контроля: Topcon X-33, Topcon X-63/X-63i, Trimble GCS 900, Prolec Digmaster PRO, Prolec Digmaster PRO+ RTK-GPS, PcX-3D, Leica iCON iXE3, Moba Xsite Pro, Moba Xsite Pro/Advanced.

*Трехмерная система контроля Prolec Digmaster PRO* обеспечивает активное информационное обеспечение оператора в режиме реального времени для повышения качества выполняемых работ.

В состав трехмерной системы контроля входят: четыре датчика наклона TS-i3 для измерения углов между элементами экскаватора, вычислительный блок GX-30, спутниковый двухканальный приемник с возможностью УКВ связи, антенна для спутниковой навигации PG-S3.

Digmaster Pro состоит из четырех основных элементов: трехосевых угловых датчиков с рабочим диапазоном  $\pm 360^\circ$  град (принцип работы основан на инерциальных датчиках); сенсора угла поворота (принцип работы датчика основан на базе магнитных сенсоров «Direct Drive»); программного обеспечения, представляющего собой высокопроизводительную платформу с максимальной областью применения, объединяющую все компоненты системы); системы GPS навигации.

Digmaster Pro в своей оптимальной конфигурации обладает сантиметровой точностью GPS навигатора и точностью сенсора угла поворота порядка  $0,5^\circ$  градуса.

Для защиты датчика при работе в жестких условиях комплектуется усиленным корпусом и гидравлическим защитным чехлом.

Система **Prolec Digmaster PRO** показывает не только положение ковша, но и учитывает данные лазерного или GPS приемника для достижения точного уклона, глубины и профиля, которая, благодаря наличию спутниковой навигации, автоматически определяет положение технологической машины в пространстве и позиционирует ковш с точностью до 20 мм. По полученным данным генерируется трехмерная модель рабочего участка в режиме реального времени.

При работе от лазерного триангуляционного датчика или модуля спутниковой навигации GPS, система позволяет автоматически принять данные процесса экскавации, построить трехмерную модель процесса для оператора, избавляя от процедуры нанесения разметки.

Индикатор отображает информацию о высоте, глубине, радиусе, положении вращения или заданной позиции, помогая добиваться определенного профиля и наклона.

Применение модулей дистанционной связи позволяет передавать данные оператору через сеть интернет или по радиоканалу. Система связи позволяет дистанционно обмениваться информацией о ходе процесса экскавации, загружать и корректировать трехмерную модель участка в режиме реального времени.

### *Анализ существующих систем контроля*

В результате анализа известных решений АСМП для строительной и ресурсодобывающей техники установлено, что существующие системы рассчитаны на использование в гидравлических экскаваторах, применяемых при строительстве. Данные экскаваторы характеризуются относительно небольшими массогабаритными характеристиками.

Одномерные системы определяют положение рабочего органа и иногда уклон относительно опорной точки (лазерного нивелира) и не фиксируют угловые перемещения платформы экскаватора.

Двумерные системы определяют положение рабочего органа по двум параметрам: высота и уклон. Системы, оснащенные электронным компасом (магнетометром) или приемниками ГНСС позволяют определить поворот платформы экскаватора.

Трехмерные системы определяют положение рабочего органа по трем пространственным координатам: высотная отметка, уклон, плановое положение машины. По этим координатам создается трехмерная модель рабочего участка. Трехмерные системы позволяют определить поворот экскаватора по магнетометру или с помощью системы спутниковой навигации.

Следует обратить внимание на узкоспециализированные системы в силу того, что они ориентированы на конкретный тип технологических машин.

Существующие узкоспециализированные системы мониторинга, такие как, «Pegasys» фирмы MineWare, выполняют комплексный мониторинг параметров функционирования драглайнов, вплоть до оценки объемов экскавации горной массы. Данные системы рассчитаны на использование в импортных драглайнах, преимущественно фирмы Komatsu (дочерняя компания) и не пригодны для эксплуатации на драглайнах серии ЭШ, имеют очень большую стоимость, требуют соответствующую инфраструктуру.

*Особенности, присущие всем системам:*

Из вышеизложенного, следует:

- 1) системы не выполняют мониторинг работы, а контролируют и показывают конечный результат;
- 2) максимальная длина линии связи составляет всего 9 метров и не может быть увеличена, поскольку системы производятся по агрегатному типу;
- 3) ориентация ковша выполняется, исходя из углов наклона стрелы, имеющей жесткую неизменяемую геометрию. Ковш шагающего экскаватора закреплен канатами, не позволяющими использовать угловые датчики ориентации на драглайнах. Канат, в отличие от жёсткой рукояти, имеет бесконечно большое количество возможных положений ковша;
- 4) магнетометр корректно работает на гидравлических механических экскаваторах для определения ориентации по оси рысканья. Применение на электрических шагающих экскаваторах и мехлопатах крайне затруднительно;
- 5) все перечисленные системы не применимы к гидравлическим экскаваторам на угольных разрезах из-за увеличенных массогабаритных характеристик;
- 6) системы имеют очень большую стоимость.

## 1.2 Анализ алгоритмов комплексирования

Применение МЭМС-датчиков в инерциальных измерительных системах требует использования цифровой обработки сигналов (ЦОС). Одним из способов нивелирования шумов является комбинирование (комплексирование) показаний МЭМС-датчиков, которое нивелирует их существенные недостатки. Для гироскопа это – дрейф нуля, чувствительность к линейным ускорениям, масштабный коэффициент и ошибки интегрирования, а для акселерометра – высокочастотный шум, слишком большая чувствительность к вибрациям и другим внешним силовым воздействиям.

Совокупность МЭМС-датчиков и счетно-решающего устройства с алгоритмами ЦОС образует инерциальный измерительный модуль (ИИМ). ИИМ, состоящий из акселерометра и гироскопа, получил название AHRS (*англ.* Attitude and Heading Reference System – система определения пространственного положения), ИИМ, состоящий из акселерометра, гироскопа и магнетометра, получил название MARG (*англ.* Magnetic, Angular Rate, and Gravity – магнитная, угловая скорость и гравитация) [41]. ИИМ является частным случаем БИНС.

Из анализа алгоритмов работы фильтров [42–44] следует, что коррекция большинства комплексирующих фильтров осуществляется за счет компонентов некоего опорного вектора или значения гравитационных полей.

Анализ существующих фильтров, показал, что основные комплексирующие фильтры могут быть представлены пятью основными типами:

1. Фильтр Калмана (Бьюси – Стратановича) и его модификации.
2. Комплементарный фильтр (композиционный / альфа – бета, фильтр Калмана с фиксированной моделью и комплементарный фильтр второго порядка).
3. Алгоритм направляющих косинусных матриц (фильтр Премерлани и Бизарда).
4. Фильтр Махони.
5. Фильтр Маджвика.

Остальные комплексирующие фильтры [45] представляют вариацию одного или нескольких основных типов фильтров и получили широкое распространение в любительских конструкциях, таких как, беспилотные летательные аппараты (дроны).

### *Фильтр Калмана (Бьюси – Стратановича)*

Комплексирующий фильтр Калмана является «промышленным стандартом» для решения многих инженерных задач, в том числе ЦОС МЭМС-датчиков, эффективно нивелирующих шумовые характеристики сигнала.

Классический фильтр Калмана [46] стал основой для построения большинства инерциальных измерительных систем, модулей [47 – 56] и алгоритмов определения ориентации.

Существуют различные варианты реализации фильтров Калмана: расширенный фильтр (EKF, Extended Kalman filter), сигма-точечный фильтр (UKF, Unscented Kalman filter), множественный фильтр, нелинейный фильтр, «обеляющий» фильтр, гибридный фильтр (Hybrid Kalman filter).

К числу достоинств описанного фильтра Калмана относится предсказание работы фильтра, что дает хорошие оценки поведения объекта ЦОС в настоящем и будущем, вероятностная модель, которая значительно снижает искажения.

К числу недостатков использования фильтра Калмана и его модификаций относится то, что они сложны в реализации, требуют большой вычислительной мощности [57–65]. Линейная регрессия повторений является основополагающей для фильтров Калмана, имеет высокие требования к частоте дискретизации, зачастую превышающей пропускную способность объекта. Состояние отношения, описывающее кинематику вращающегося тела в трёх проекциях, зачастую необходимо большое количество векторов состояния и реализации расширенного фильтра Калмана для линеаризации задачи. Для решения задач ЦОС МЭМС - датчиков необходимо мощное вычислительное устройство, позволяющее реализовать фильтр Калмана.

### Комплементарный фильтр первого порядка

Комплементарный фильтр представляет собой упрощенную модель фильтра Калмана для одномерного случая, в котором звено интерполяции представляет первое слагаемое [66–74]. Комплементарный фильтр описывается следующим выражением:

$$\alpha = (1-k) \cdot gir + k \cdot acc \quad ,$$

где  $\alpha$  – отфильтрованный результирующий угол наклона;

$gir$  и  $acc$  – значения угла наклона и поворота, полученные при помощи гироскопа и акселерометра, соответственно;

$k$  – коэффициент комплексирования комплементарного фильтра.

Схема комплементарного фильтра первого порядка представлена на рис. 1.7.

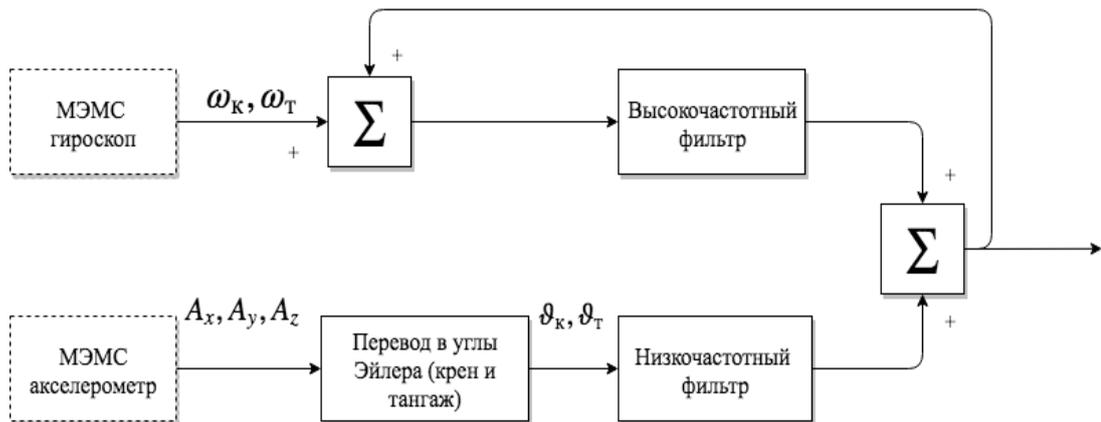


Рисунок 1.7 – Схема комплементарного фильтра первого порядка

Приращение угла определяется угловой скоростью, регистрируемой гироскопом на предыдущей итерации работы алгоритма. Комплементарный фильтр обладает небольшой вычислительной сложностью, благодаря которой получил широкое распространение в авиации и различных системах стабилизации.

Отфильтрованная величина угла наклона представляет собой комплексированное значение показаний интегрированного угла по гироскопу и мгновенного значения угла наклона акселерометра в пропорции, определяемой

коэффициентом  $k$ . На каждой итерации фильтра происходит интегрирование нового значения комплексированного угла со значением угла, полученным на прошлой итерации работы фильтра.

К достоинствам комплементарного фильтра относятся: простота настройки, невысокие требования к вычислительным ресурсам, простота в реализации, приемлемая точность определения угла.

К недостаткам композитного фильтра относятся: функционирование только по осям крена и тангажа, поскольку присутствует неопределенность при повороте акселерометра по оси рысканья, которая не позволяет выполнить коррекцию по вышеуказанной оси, ограниченные возможности фильтрации.

### ***Комплементарный фильтр второго порядка***

Данный фильтр представляет собой вариацию комплементарного фильтра первого порядка с дополнительной интегрально–пропорциональной обратной связью (корректирующее звено), интегральное звено представлено в виде  $k^2$ , а пропорциональное звено представлено в виде  $2k$ . Такое корректирующее звено применяется для сохранения устойчивости и требуемого качества переходных процессов [75–78]. В результате чего фильтр имеет лучшее сглаживание, а так же меньшую ошибку между измеренным и реальным углом. Блок-схема комплементарного фильтра второго порядка представлена на рис. 1.8.

Результат работы комплементарного фильтра по точности определения угла и качеству фильтрации значительно приближен к фильтру Калмана.

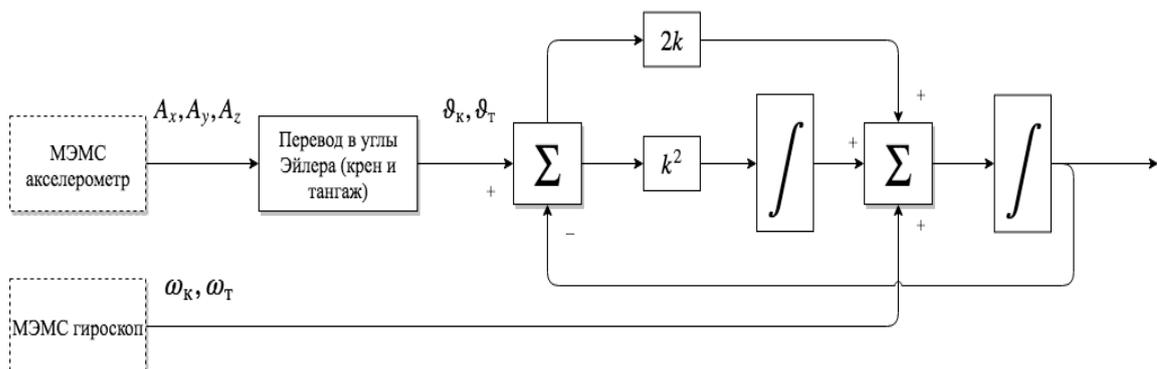


Рисунок 1.8 – Комплементарный фильтр второго порядка

К достоинствам комплементарного фильтра второго порядка относится высокая достоверность показаний, невысокие требования к вычислительным ресурсам, простота настройки.

Недостатки фильтра: фильтр не работает по оси рысканья, поскольку невозможно получить компоненту вращения по оси рысканья при использовании акселерометра.

### *Алгоритм направляющих косинусных матриц (матрицы поворота)*

Привлекает внимание в аспекте проблематики нашего исследования работа коллектива авторов – Вильяма Примерлани и Поля Бизарда совместно с Роберотом Махони [79], в которой авторы предложили выполнять коррекцию посредством ПИ – регулятора. ПИ – регулятор обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования и, тем самым, замедляет накопление ошибки. Гироскоп используется в качестве основного источника информации, сигналы которого подвержены дрейфу и ошибкам квантования дискретного интегрирования, вследствие чего нарушается ортогональность матрицы поворота. Идентификация и нивелирование ошибок измерения выполняется относительно опорных векторов, по оси рысканья, компонентом опорного вектора является угол курса, получаемый ГНСС приемником, для нивелирования ошибок по крену и тангажу используется компонент опорного вектора – направление силы тяжести, получаемый с акселерометра. Схема алгоритма направляющих косинусных матриц приведена на рис. 1.9.

Алгоритм, прежде всего, рассчитан на применение в составе систем управления любительских летательных аппаратов, вследствие чего расчет кинематики и комплексирование данных адаптировано для особенностей динамики летательных аппаратов.

К числу достоинств описанного алгоритма направляющих косинусных матриц относится простота реализации и низкие требования к вычислительному устройству.

К числу недостатков относится функционирование алгоритма в углах Эйлера, что создает проблему «складывания рамок», требуется рассчитывать антисимметричную матрицу для коррекции ортогональности матрицы поворота.

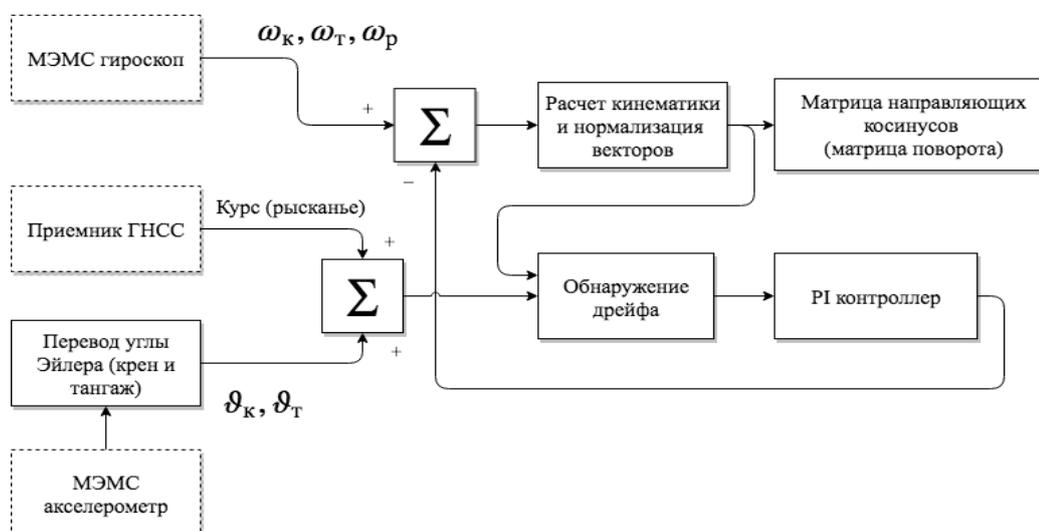


Рисунок 1.9 – Схема алгоритма направляющих косинусных матриц

### *Фильтр Маджвика*

Особенностью фильтра Маджвика является то, что он функционирует на основе показаний инерциальных датчиков (ускорение, угловая скорость) и характеристик магнитного поля Земли, оптимизирует свою работу за счет градиентного метода. Анализ показал, что этот фильтр – один из современных комплексующих фильтров для определения ориентации в пространстве [80].

Фильтр существует в двух реализациях:

- 1) на основе акселерометра и гироскопа (AHRS);
- 2) на основе акселерометра, гироскопа и магнетометра (MARG).

Мы полагаем, что рациональный вариант разработки АСМП должен быть основан на комплексующем фильтре Маджвика в реализации MARG. В фильтре Маджвика в реализации MARG выполняется компенсация магнитных дисторсий (искажений) и коррекция дрейфа гироскопа по оси рысканья.

Схема фильтра в реализации MARG представлена на рис. 1.10.

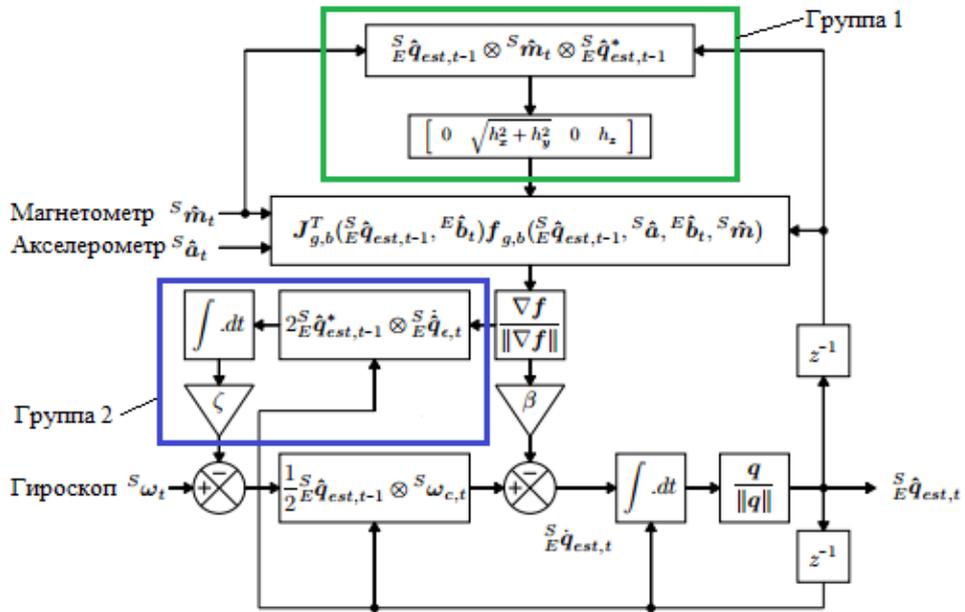


Рисунок 1.10 – Схема фильтра Маджвика во второй реализации, включающая коррекцию магнитных искажений (группа 1) и коррекцию дрейфа гироскопа (группа 2)

Магнитные искажения компенсируются в блоке «группа 1», выделенной на схеме фильтра. Направление магнитного поля Земли в момент времени –  $E \hat{h}_t$  рассчитывается как нормированное значение данных магнетометра  $S \hat{m}_t$ , вращаемое ориентацией, рассчитанное комплексировающей функцией  $S \hat{q}_{est,t-1}$ , комплексировающая функция описывается следующим выражением:

$$E \hat{h}_t = \begin{bmatrix} 0 & h_x & h_y & h_z \end{bmatrix} = S \hat{q}_{est,t-1} \otimes S \hat{m}_t \otimes S \hat{q}_{est,t-1}^* .$$

Наклон корпуса магнетометра, как следствие неправильной проекции магнитного поля Земли на магнетометр в контролируемом направлении, корректируется при условии, если относительное направление магнитного поля Земли –  $E \hat{b}_t$  имеет одинаковый наклон в течение всего времени, это достигается расчетом ортогональных векторов  $E \hat{b}_t$  и  $E \hat{h}_t$  только по на оси крена и тангажа, что описывается следующим выражением:

$$E \hat{b}_t = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{h_x^2 + h_y^2} & 0 & h_z \end{bmatrix} .$$

Данный способ коррекции нивелирует магнитные искажения по осям крена и тангажа, магнитные возмущения влияют только по оси рысканья.

Коррекция дрейфа гироскопа осуществляется в «блоке 2», выделенного на схеме фильтра. Дрейф гироскопа представлен как часть ошибки от скорости изменения ориентации  ${}^S_E \hat{q}_\varepsilon$ , выраженная как угловая погрешность по каждой оси гироскопа, она описывается следующим выражением:

$${}^S \omega_{\varepsilon,t} = 2 {}^S_E \hat{q}_{\varepsilon,t-1} \otimes {}^S_E \hat{q}_{\varepsilon,t} .$$

Дрейф гироскопа  ${}^S \omega_b$  представлен как постоянная составляющая  ${}^S \omega_\varepsilon$ , которая может быть удалена, так как часть  ${}^S \omega_\varepsilon$  является средневзвешенным с соответствующим коэффициентом усилением  $\zeta$ . Данный подход частично компенсирует дрейф гироскопа и описывается следующими выражениями:

$${}^S \omega_{b,t} = \zeta \sum_t {}^S \omega_{\varepsilon,t} \Delta t ,$$

$${}^S \omega_{c,t} = {}^S \omega_t - {}^S \omega_{b,t} .$$

Скомпенсированный дрейф  ${}^S \omega_c$  используется вместо исходных измерений гироскопа.

Коэффициенты усиления.

Фильтр в реализации MARG имеет два коэффициента усиления:

– коэффициент  $\beta$  представляет суммарные ошибки гироскопа, представленные как величина производного кватерниона;

– коэффициент усиления  $\zeta$  характеризует скорость сходимости для нивелирования ошибок измерений гироскопа, не связанных с нулем, выражен как производная кватерниона.

Данные ошибки описывают смещение гироскопа. Коэффициенты представлены как угловые величины, где:  $\omega_\beta$  – оценка средней погрешности измерения дрейфа гироскопа по каждой оси,  $\omega_\zeta$  – расчетная скорость дрейфа гироскопа в каждой оси. Коэффициент усиления  $\beta$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \tilde{q} \otimes [0 \tilde{\omega}_\beta \tilde{\omega}_\beta \tilde{\omega}_\beta] \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\beta, \quad (1.1)$$

где:  $\tilde{q}$  – единичный кватернион;  $\otimes$  – кронекеровское произведение матриц.

Коэффициент усиления  $\zeta$  рассчитывается по формуле:

$$\zeta = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\zeta. \quad (1.2)$$

В задаче ориентации используется система гиперкомплексных чисел (кватернионы), которую возможно корректировать показаниями акселерометра и гироскопа для выполнения аналитических вычислений. Система гиперкомплексных чисел оптимизируется методом градиента для расчета вектора направления погрешности гироскопа в виде производной системы гиперкомплексных чисел. Оптимизация работы методом градиента позволяет задавать режим работы фильтра одним или двумя коэффициентами, которые возможно корректировать в процессе работы. Низкие требования к счетно–решающему устройству позволяют реализовать АСМП на отечественных МК или ПЛИС.

Отличительные особенности фильтра Маджвика:

- один (AHRS) или два (MARG) регулируемых параметра, рассчитываемых на основе реакции системы;
- высокая эффективность при небольших частотах дискретизации;
- высокая производительность (109 арифметических операций на каждую итерацию обновления фильтра в первой реализации и 277 арифметических операций во второй вариации).

Применение кватерниона для ориентации в трехмерном пространстве позволяет избежать проблемы «шарнирного замка» (складывание рамок или gimbal lock), связанных с углами Эйлера–Крылова.

Фильтр позволяет компенсировать дрейф гироскопа и магнитные искажения в текущий момент работы. Ошибка ориентации рассчитывается с помощью метода градиента.

Комплексирование данных, полученных с датчиков, выполняется с помощью пропорционального звена и дискретного интегрирования, углы Эйлера–Крылова используются в качестве опорных координат, относительно которых рассчитывается ошибка скорости вращения.

### *Фильтр Махони*

Фильтр Махони реализован в версиях MARG и AHRS. Фильтр Махони представляет собой нелинейный комплементарный фильтр, имеющий сходство по принципу работы с фильтром Маджвика. Главное отличие - ошибка ориентации, рассчитываемая не градиентным спуском, а векторным умножением [81–87].

Вектор коррекции рассчитывается ПИ регулятором, где вектор ошибок, управляющий работой ПИ регулятора, рассчитывается из ранее оцененного отношения вектора направления силы тяжести. Тем не менее, анализ литературы показал, что фильтр Махони не позволяет качественно решить проблему нивелирования ошибок МЭМС-датчиков, фильтр хорошо функционирует в реализации AHRS, но в реализации MARG происходит значительное снижение точности определения угла.

Фильтр Махони производит оценку дрейфа гироскопа при помощи ПИ-регулятора, благодаря которому отсутствует дрейф гироскопа, но присутствует перманентная ошибка ориентации, определяемая глубиной обратной связи ПИ-регулятора. Таким образом, фильтр Махони сводится к комплементарному фильтру, используемому независимо для каждой из осей, а так же оперирующим кватернионам. Работу фильтра можно упростить за счет нормализации показаний. Схема фильтра Махони, реализованного в версии AHRS приведена на рис. 1.11.

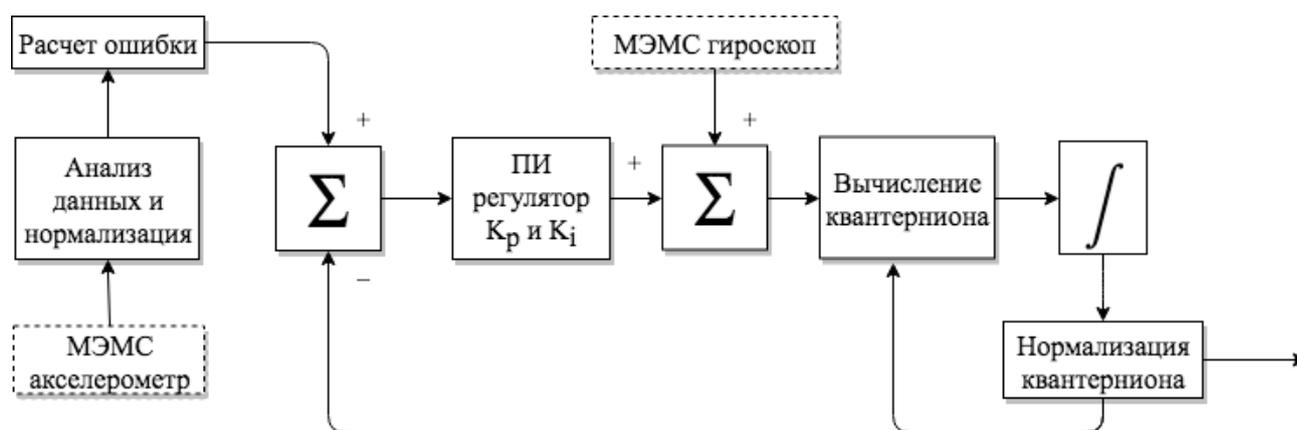


Рисунок 1.11 – Схема фильтра Махони

В [88–90] представлено сравнение фильтра Калмана, комплементарного фильтра, фильтра Маджвика и фильтра Махони. Из этой статьи следует, что, комплементарный фильтр, фильтр Маджвика и фильтр Махони описываются одинаковыми передаточными функциями, но вычисление коррекции выполняется разными способами. Несмотря на то, что фильтры имеют одинаковые передаточные функции, они не идентичны фильтру Калмана.

### ***Выводы по существующим комплексирующим фильтрам***

Исследование комплексирующих фильтров позволяет сделать вывод о том, что:

1. *Фильтр Калмана* имеет широкую область применения, высокую достоверность показаний, хорошее качество фильтрации, оценивает и прогнозирует состояние системы, имеет множество возможных реализаций, позволяющих подобрать фильтр для определенной задачи.

Недостатки фильтра: сложен в настройке, для функционирования требуется быстродействующее вычислительное устройство, высокая частота дискретизации, которая может превышать физические возможности объекта, обязательно наличие математической модели датчиков, избыточен для АСМП.

2. Применение *комплементарного фильтра первого и второго порядка* нецелесообразно в виду того, что фильтр не функционирует по оси рысканья;

3. *Фильтр направляющих косинусных матриц* оперирует матрицей поворота, что вызывает проблему «шарнирного замка» – вырождения матрицы при повороте на  $90^\circ$  град, расчет кинематики и коррекция данных адаптирована для особенностей динамики летательных аппаратов. Алгоритм базируется на основе фильтра Махони.

4. *Фильтр Махони* значительно нивелирует ошибку ориентации по оси рысканья, но не устраняет ее полностью, по сути, представляет собой ПИ-регулятор. Для фильтра характерно отсутствие дрейфа и перманентная ошибка ориентации, реализация MARG уступает точности реализации AHRS.

5. *Фильтр Маджвика* не выполняет коррекцию по оси рысканья без магнетометра, функционирование осуществляется по аналогии с работой комплементарного фильтра по осям крена и тангажа. Использование магнетометра эффективно нивелирует ошибку дрейфа нуля гироскопа и угловой ориентации по оси рысканья.

### **1.3 Методы анализа стабильности МЭМС-датчиков динамических величин**

Для датчиков, входящих в состав инерциальных измерительных систем, функционирующих продолжительное время в автономном режиме, актуальны вопросы описания ошибок, шумов и точности показаний таких датчиков стандартными статистическими методами. Данные методы необходимы для симуляции работы систем подобного рода и оценки работы датчиков для оптимальной настройки комплексирующих фильтров [91–93].

К настоящему времени определились два основных способа оценки ошибок, шумов и точности, применимых к МЭМС-датчикам: использование методов вариации (дисперсии) Аллана (Allan Variances), представляющих собой измененный метод дисперсионного анализа ANOVA и спектральной плотности мощности (*англ.* Power Spectral Density – PSD) [94, 95]. Применение таких методов, как вариации Аллана, дало возможность анализировать рабочие

характеристики, режимы работы, точность работы часов, генераторов и МЭМС-датчиков.

Работы [96–99] наиболее полно отражают специфику определения шумовых характеристик.

***Цель применения методик:***

– изучение влияния внешних факторов, собственной нестабильности датчиков МА и МГ для динамической автоподстройки и коррекции комплексирующего фильтра Маджвика для достижения оптимального функционирования;

– выбор рационального метода анализа МЭМС-датчиков, пригодного для автономной оценки счетно–решающим устройством АСМП характеристик МЭМС-датчиков;

– определение необходимого временного интервала, через который МА и МГ входят в рабочий режим с установившимися характеристиками;

– апробирования методики предварительной калибровки МА и МГ;

– выбор МЭМС-датчика, отвечающего требованиям надежности и стабильности.

Методики измерения устойчивости временной области часов, генераторов и МЭМС-датчиков основаны на статистике колебаний фазы или частоты колебаний, как функции времени.

Используется семь основных типов шумовых составляющих для описания работы МЭМС-датчиков: шум квантования (белый фазовый), случайное блуждание (дрейф) угла (белый частотный шум), розовый (мерцающий) шум (нестабильность смещения нуля), случайное блуждание (дрейф) скорости, шум непрерывного ухода скорости, мультипликативная систематическая погрешность, синусоидальный шум [100, 101]. Перечисленные шумовые составляющие указаны для гироскопов, отличия от акселерометров обусловлены лишь в терминах и размерностью величины.

Данные шумовые составляющие определяются методами вариации Аллана или PSD [102]:

- 1) среднеквадратичное отклонение;
- 2) вариация Аллана;
- 3) наложенная (перекрывающаяся) вариация Аллана;
- 4) измененная вариация Аллана (вариация Адамара);
- 5) вариация Адамара;
- 6) наложенная (перекрывающаяся) вариация Адамара.
- 7) измененная вариация Адамара;
- 8) общая вариация Адамара;
- 9) общая вариация;
- 10) измененная общая вариация;
- 11) вариация Theol;
- 12) временная вариация;
- 13) временная общая вариация.

### ***Выводы по существующим методам анализа точности МЭМС-датчиков динамических величин***

Сигналы, поступающие с датчиков, сильно зависят от внешних факторов, содержат большое количество паразитных шумов и нестабильностей. Изучение влияния внешних факторов на функционирование МЭМС-датчиков для минимизации их влияния выполняется на основе комбинированного или отдельного применения методов вариации Аллана [103].

Из методов определения точности МЭМС-датчиков практическую ценность представляет наложенная вариация Аллана, выбор которой обусловлен низкими требованиями к объему оперативной памяти и вычислительной мощности счетно–решающего устройства. Функционирование АСМП подразумевает отсутствие обслуживания в течение длительных временных интервалов, поэтому возникает

необходимость периодической переоценки характеристик МГ и МА без использования сторонних вычислительных ресурсов.

#### **1.4 МЭМС-датчики ускорения и угловой скорости: анализ рынка МЭМС, обоснование выбора датчиков динамических величин**

По вопросу классификации МЭМС-датчиков существует несколько подходов, которые относят МЭМС-датчики к двум основным классам [104]:

- первый класс – системы, преобразующие различные физические воздействия (свет, звук, ускорение) в сигнал;
- второй класс – системы, преобразующие сигнал в различные физические воздействия.

Микроэлектромеханические гироскопы (МГ) и микроэлектромеханические акселерометры (МА) относятся к первому классу.

МГ функционируют в качестве датчика угловой скорости, который преобразует проекцию угловой скорости по измеряемой чувствительной оси в цифровой или аналоговый сигнал, пропорциональный проекции действующей угловой скорости, МГ слабовосприимчив к линейным ускорениям.

МА преобразует проекции кажущегося линейного ускорения в цифровой или аналоговый сигнал, пропорциональный проекции действующего ускорения по чувствительной оси [105].

Анализ рынка МЭМС-датчиков показал, что в конструкции большинства МГ заложен принцип действия на основе силы Кориолиса, действующей на чувствительный элемент, который, отклоняясь под действием вышеуказанной силы, регистрируется и преобразуется в угловую скорость [106].

Принцип работы большинства распространенных МА основывается на изменении емкости чувствительного элемента посредством перемещения обкладки конденсатора, закрепленной на инерционной массе вдоль чувствительной оси под действием ускорения. Вторая обкладка неподвижна и закреплена за внутренние элементы конструкции МА. Регистрируемое изменение

емкости вследствие перемещения инерционной массы с обкладкой конденсатора пересчитывается в сигнал, пропорциональный ускорению [107].

Конструктивно МА и МГ имеют много общего по внутренней конструкции и архитектуре.

К числу достоинств МА и МГ следует отнести надежность, малые массогабаритные характеристики, невысокую стоимость, малое энергопотребление, высокую устойчивость к динамическим перегрузкам.

К недостаткам следует отнести высокую зашумленность сигнала, невысокую стабильность, чувствительность к изменению температуры, большой паразитный дрейф.

### ***Микроэлектромеханические гироскопы***

Широкое распространение в различных областях человеческой деятельности получили МГ. С течением времени МГ вытеснили классические механические гироскопы в различных инерциальных измерительных системах. Технология МЭМС позволяет создавать компактные, чувствительные, надежные малопотребляющие датчики.

### ***Основные параметры МГ***

К основным характеристикам МГ относятся следующие параметры [108]:

- полный диапазон чувствительности;
- смещение нуля;
- чувствительность;
- изменение чувствительности под действием температуры;
- изменение нулевого значения под действием температуры;
- нелинейность;
- полоса пропускания/полоса частот;
- стабильность между включениями;

- чувствительность к линейному ускорению;
- шумовые характеристики;
- частота обновления выборок.

Подробное описание основных характеристик МГ приведено в приложении Д.

### ***Основные типы современных гироскопов***

Современная промышленность выпускает разнообразные типы МГ, которые различаются по технологии производства, принципам функционирования, архитектуре, точности, динамическим диапазоном, стоимостью и областью применения.

***Основные типы МГ:*** вибрационные гироскопы, камертонные гироскопы, полусферические резонансные гироскопы, кольцевые резонаторы, вращающееся колесо, вибрирующее колесо, пьезоэлектрические гироскопы, твердотельные волновые гироскопы, волоконно–оптические гироскопы, микрооптические, электромеханические гиросистемы, лазерные гироскопы, интерферометрические МОEMS гироскопы. Различают гироскопы с чувствительным элементом, представляющим собой подвешенную массу: с сосредоточенной массой, с распределенной массой, с карданным подвесом, с маятниковым подвесом [109].

***Основные производители гироскопов:*** Analog Devices, Bosch, Denso, BEI, Systron Donner, Infineon, Matsushita, Melexis, ATA, Honeywell, Corrsys-Datron, Epson Toycom, Gyration, Murata, MEMSense, Analog Devices, 0-Navi, Silicon Sensing & BAE, Watson, Silicon Senses, Freescale.

***Отечественные разработчики МГ:*** ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», ЗАО «ГИРООПТИКА», АО «НИИ «Элпа», МА ФГУП «НИИ Физических измерений».

## *Микроэлектромеханические акселерометры*

МА наряду с МГ занимают лидирующие позиции в списке самых используемых МЭМС-датчиков [110, 111]. Без них невозможно представить современную жизнь, они используются во многих областях техники, в которых необходимо определять положение в пространстве, отслеживать линейное ускорение, стабилизировать объекты, регистрировать вибрацию. МА используются в автомобильной промышленности, в смартфонах и компьютерной технике.

Например, МА в автомобильной промышленности используется для систем АБС, системы контроля крена и боковых опрокидываний, системы подушек безопасности и многих других. Применение в смартфонах позволяет определить текущую ориентацию и сориентировать положение дисплея в нужную плоскость, МА в составе компьютерной техники блокируют считывающую головку жесткого магнитного диска в случае падения или удара.

Современные методы травления кремниевых структур позволяют создавать объемные микроструктуры с высочайшей надежностью и малой стоимостью. Исследование номенклатуры производителей выявило три основных типа МА [112, 113]: пьезоэлектрические, пьезорезисторные, емкостные.

Существует два основных типа МА: с осевой и с маятниковой инерционной массой. По способу считывания данных: прямое и компенсационное считывание. По количеству измеряемых осей: одноосевые, двухосевые, трехосевые. Возможно большее количество осей для применения в специализированных системах.

По детектируемому динамическому диапазону акселерометры бывают двух классов [114]:

- акселерометры с малым динамическим диапазоном ускорения (low-g) до  $\pm 20$  G. Применяются для детектирования ускорения автомобилей, измерения углов наклона (боковых кренов) и вибрации;

- акселерометры с большим динамическим диапазоном ускорения (high-g) – более  $\pm 20$  G. Применяются для детектирования ударов и перегрузок, например,

применяются во фронтальных подушках безопасности и детектирования перегрузок.

Основные параметры МА аналогичны основным параметрам МГ, за небольшими исключениями.

Основные производители гироскопов – Bosch, Denso, BEI, Systron Donner, Infineon, Matsushita, Colibrys, Sensoror Technologies AS, ATA, Honeywell, Corrsys-Datron, Gyration, Murata, MEMSense, Analog Devices, 0–Navi, Silicon Sensing & BAE, Watson, Silicon Senses, Freescale, Sagem, Kionix.

Отечественные производители МА (как правило, гибридного или пьезоэлектрического типа) – ФННЦ РНКБ; ФГУН "НИИ физических измерений", ОАО АННН "ТЕМП-АВИА"; ЗАО "ГИРООПТИКА".

### *Анализ рынка МЭМС-датчиков*

В результате проведенного анализа рынка МЭМС-датчиков установлено:

На сегодняшний день существует большая номенклатура выпускаемых МЭМС-датчиков различных производителей для различных областей применения. Основные характеристики МГ для промышленного применения представлены в табл. Д.1. в приложении Д.

Основные характеристики МА для промышленного применения представлены в табл. Д.2. в приложении Д.

Основные характеристики интегрированных ИИМ для промышленного применения представлены в табл. Д.3. в приложении Д.

Большая часть МГ функционирует на основе силы Кориолиса, большая часть МА функционирует на основе изменения емкости вызванного ускорением.

МЭМС-датчикам присуще большое количество различных шумов и нестабильностей, которые исследуются вариациями Аллана и нивелируются комплексными фильтрами.

Анализ отечественных производителей [115–119] МГ и МА выявил значительное отставание от импортных производителей по технологии

изготовления, качеству работы, массогабаритным характеристикам, доступности. Некоторые отечественные производители не предоставляют подробную информацию о характеристиках датчиков, поскольку они засекречены.

При разработке АСМП на первых этапах целесообразно применять импортные датчики, по мере увеличения программы внедрения целесообразно применять отечественные датчики.

### **1.5 Обоснование выбора МЭМС-датчиков для построения ИИМ**

Существует большое количество фирм – производителей МЭМС-датчиков, представляющих огромную номенклатуру своих разработок.

Выбор датчиков для ИИМ АСМП диктуется условиями эксплуатации. Технологические машины угольных предприятий функционируют в тяжелых условиях (сильная вибрация, температурные скачки, повышенный уровень радиации, электромагнитные возмущения), поэтому к датчикам угловой скорости и ускорения в составе ИИМ предъявляются высокие требования.

Мы проанализировали условия эксплуатации ГТМ и пришли к заключению, что применение цифрового компаса (магнитометра) в составе ИИМ нецелесообразно, в виду сильных электромагнитных помех первого типа (искажение твердого в магнитном отношении железа, англ. Hard Iron Distortion) от силового оборудования и, особенно, от двигателей; электромагнитных помех второго типа (искажения мягкого в магнитном отношении железа, англ. Soft Iron Distortion) – большого количества металлических конструкций и необходимостью периодической калибровки [120–122]. В связи с этим необходимо использовать ИИМ без магнетометра.

Угловая скорость поворота платформы экскаватора имеет небольшой динамический диапазон, порядка  $8^\circ/\text{с}$ , который измеряется МЭМС-датчиками с небольшим динамическим диапазоном измерений:

– для МГ оптимальный диапазон измерений до  $125^\circ/\text{с}$ , максимальный диапазон  $245^\circ/\text{с}$ . Измеряемая ось – ось рысканья;

– для МА оптимальный диапазон измерений не более  $\pm 2G$ , измеряемый по осям крена, тангажа и рысканья.

В виду вышеперечисленных требований будем выбирать датчики, руководствуясь параметрами, изложенными в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Основные параметры для выбора МЭМС-датчиков для АСМП

Параметр	МГ	МА
Область применения	Автомобильное, промышленное применение или для жестких условий эксплуатации	
Рабочая температура	–40 до +85;	
Динамический диапазон	не более $150^\circ/\text{сек}$	не более $\pm 2G$ ;
Тип выходного сигнала	Цифровой	
Детектируемые оси	Ось рысканья	Оси – X,Y,Z
Собственный уровень шума, не более	$0,15 \frac{^\circ}{\sqrt{\text{Гц}}}$	$250 \frac{\mu G}{\sqrt{\text{Гц}}}$
Стоимость (рублей), не более	20 000	10 000

Таким образом, в результате подбора МЭМС-датчиков согласно требованиям в табл. 1.2, были выбраны следующие модели датчиков:

1. МГ – ADIS 16260/16265 фирмы Analog Devices [123].
2. МА – SCA3100/SCA3300 фирмы Murata [124].
3. ИИМ на основе комбинированного датчика SCC2230–02 фирмы Murata содержащей МА и МГ [125].
4. МА – AIS328DQ [126], МГ – A3G4250D [127] или ИИМ на основе комбинированного датчика – ASM330LHH фирмы STMicroelectronics.

## 1.6 Выводы по первой главе

На основе системного анализа рынка АСМП и МЭМС-датчиков, комплексирующих фильтров, определены основные недостатки, особенности существующих систем автоматизированного мониторинга, их элементной базы, ограничения по функционированию комплексирующих фильтров.

1. Проведенный обзор существующих АСМП выявил необходимость создания автоматизированной системы мониторинга и позиционирования, позволяющей выполнять анализ эффективности функционирования ГТМ, в особенности, отечественного производства. Создание унифицированной АСМП позволит выполнять автоматизированный мониторинг на разных типах ГТМ.

2. Сравнительный анализ алгоритмов комплексирования показал, что оптимальным решением является использование фильтра Маджвика в реализации MARG для создания программного обеспечения АСМП, поскольку не требуется быстродействующее счетно–решающее устройство и выполняется коррекция по оси рысканья за счет дополнительных датчиков.

3. Исследование литературы, посвященной методам анализа стабильности, выявило, что оценка МЭМС-датчиков может осуществляться методами, применяемыми для анализа стабильности часов и генераторов.

Для МЭМС-датчиков 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 МК или ПЛИС, удовлетворяет требованиям точности и стабильности.

4. В результате обзора современной элементной базы МЭМС-датчиков динамических величин нами определен критерий выбора элементной базы, датчиков МА и МГ. Установлено, что МГ функционирует в режиме датчика угловой скорости, МА функционирует в режиме датчика кажущегося ускорения. Нами предлагается в качестве основы метода автоматизированного мониторинга использовать измерение угловой скорости и ускорений платформы ГТМ.

5. В результате анализа рынка МЭМС-датчиков выбрана элементная база для построения ИИМ. Установлено, что целесообразно использовать следующие модели МЭМС-датчиков для создания АСМП: МГ – ADIS 16260/16265; МА – SCA3100/SCA3300; ИИМ SCC2230–02. Для вспомогательных устройств - МА – AIS328DQ и МГ – A3G4250D.

В связи с вышеизложенным, в следующих главах решаются задачи.

1. Исследование шагающих экскаваторов и мехлопат, как объектов автоматизации, разработка способа и алгоритма идентификации основных технологических состояний драглайнов и мехлопат выполняются во второй главе научного исследования.

2. Разработка, сборка основных модулей АСМП, сбор данных для компьютерного моделирования комплексирующих фильтров АСМП и разработка программного обеспечения осуществляются в третьей главе.

3. Экспериментальные исследования функционирования АСМП в производственных условиях, исследование возможности применения изготовленного опытного образца АСМП для ГТМ описаны в четвертой главе.

4. Тестирование и калибровка модулей датчиков выполняется в четвертой главе.

## **2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСКАВАЦИИ И ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСМП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГТМ**

### **2.1 Технологический процесс экскавации горной массы**

Исследуем особенности выполнения ТПЭ и режимы работы ГТМ в производственных условиях для решения задачи разработки архитектуры АСМП.

**Задача исследования ТПЭ** – изучение отличительных особенностей выполнения технологических операций ГТМ по перевалке горной массы, которые характеризуются набором технологических состояний.

**Задача исследования ГТМ** – изучение конструктивных, технологических, функциональных особенностей, характеристик ГТМ для четкого представления о возможных технологических состояниях и характерных признаках выполнения ТПЭ.

Наше исследование проводилось на шагающих экскаваторах серии ЭШ (драглайнах) и электрических одноковшовых гусеничных выемочно–погрузочных экскаваторах серии ЭКГ (мехлопатах). К шагающим экскаваторам относятся модели: ЭШ 10/70 и ЭШ 10/50, которые имеют аналогичное шасси, узлы и агрегаты, но имеют отличия в длине стрелы и объеме ковша. К экскаваторам серии ЭКГ относится модель ЭКГ–8И [128–132].

Анализ ТПЭ ГТМ в условиях открытых горных работ на разрезе «Кедровский», с учетом требований заказчика – компании УК «Кузбассразрезуголь», показал, что ТПЭ драглайнов можно охарактеризовать семью основными и одним вспомогательным рабочими состояниями, ТПЭ мехлопат можно охарактеризовать семью основными и одним вспомогательным рабочими состояниями. Выполнение ТПЭ поддерживается жестким соблюдением требуемых режимов работы ГТМ, посредством непрерывного автоматизированного мониторинга работы ГТМ.

Согласно требованиям заказчика, изложенным в техническом задании на «разработку и внедрение системы автоматизации процессов мониторинга и

позиционирования функциональных узлов технологических машин», которое приведено в приложении В. Мониторинг осуществляется путем регистрации и анализа динамических величин ТПЭ ГТМ специализированной унифицированной АСМП: угловой скорости посредством МГ и кажущегося ускорения посредством МА, пространственных координат посредством ГНСС, временных показателей посредством таймера–счетчика в составе дискретного счётно–решающего устройства – микроконтроллера (МК), а так же отслеживание наличия бортового электропитания посредством детектора бортового электропитания. Функционирование АСМП требует вспомогательного состояния для выполнения мониторинга.

Мониторинг основных состояний ГТМ, совместно с использованием основных геометрических показателей, обеспечивает возможность автоматического ведения паспорта технологического участка с указанием координат отвалов и забоев.

### ***Основные технологические состояния драглайнов при выполнении ТПЭ***

Рассмотрим технологические состояния, характерные для драглайнов.

*Холостой ход* ( $C_{xx}^D$ ) – состояние, при котором не задействованы силовые приводы поворота, тяги и подъема канатов ковша. Характерные признаки  $C_{xx}^D$ : угловая скорость платформы экскаватора –  $\omega_n$  удовлетворяет условию  $\omega_n \approx \omega_{op}$ ,  $\omega_{op}$  – где угловая скорость дрейфа МГ, ускорение платформы не превышает дрейф МА –  $A_o$ , присутствует логическое суждение о наличие бортового электропитания, регистрируемого подсистемой питания ( $U_{борт} = \text{истина}$ ), дополнительным признаком является отсутствие значительных изменений пространственных координат,

*Черпание* ( $C_q^D$ ) – состояние, при котором последовательно задействованы приводы тяги и подъемных канатов ковша. Заброс ковша в забой осуществляется ослаблением канатов подъема соответствующим приводом. Ковш черпает горную

массу за счет собственного веса и зубьев, формирующих режущую кромку. Заглубление ковша определяется натяжением подъемных канатов и положением крепления упряжи в передних проушинах ковша. При креплении тяговых цепей к верхней проушине ковша, толщина стружки увеличивается. Черпание осуществляется за счет натяжения канатов приводом тяги. Подъем ковша осуществляется одновременной работой приводами тяги и подъема.

Характерные признаками ( $C_4^D$ ): угловая скорость платформы драглайна –  $\omega_n$  удовлетворяет условию  $\omega_{op} - \omega_ч < \omega_n < \omega_{op} + \omega_ч$ , где  $\omega_{op}$  – дрейф МГ,  $\omega_ч$  – определяет доверительный интервал угловой скорости  $C_4^D$ , акселерометр фиксирует кратковременные ускорения вследствие вибрации или ударов ковша, дополнительным признаком является незначительное изменение пространственных координат. На рис. 2.1. представлен ковш драглайна в момент черпания горной массы.

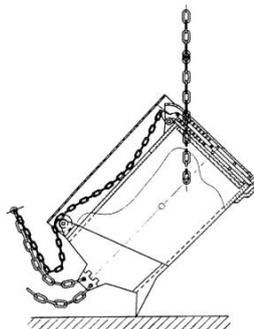


Рисунок 2.1 – Ковш драглайна во время черпания при забросе в забой (вид сбоку)

*Разгрузка* ( $C_p^D$ ) – состояние, при котором задействованы приводы тяги и подъема ковша. Разгрузка ковша осуществляется одновременным ослаблением тягового и подъемного каната. При ослаблении канатов ковш опрокидывается передней частью, из которого высыпается горная масса. Драглайн способен выполнять разгрузку с остановкой платформы или совмещать с транспортировкой (поворотом платформы экскаватора вплоть до полного оборота) для сокращения времени рабочего цикла. Как правило, разгрузка осуществляется с остановкой платформы и поворотом в исходную точку экскавации. Для технологического

состояния характерны признаки: наличие резких ускорений вдоль продольной оси и изменение продольного наклона платформы драглайна, угловая скорость платформы –  $\omega_n$  удовлетворяет условию  $\omega_{op} < \omega_n$ , дополнительным признаком является принадлежность пространственных координат к некоторому значению. На рис. 2.2. представлен ковш драглайна во время разгрузки горной массы.

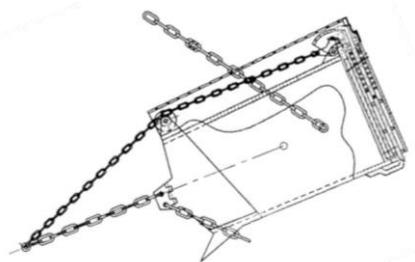


Рисунок 2.2 – Положение ковша драглайна в момент разгрузки

*Транспортировка на разгрузку* ( $C_{тр}^D$ ) – состояние, при котором привод подъема ослабляет трос, происходит опускание ковша, затем выполняется поворот. Характерные признаки  $C_{тр}^D$  –  $\omega_{op} < \omega_n \leq \omega_{mp}$ , где  $\omega_{mp}$  – верхняя граница допустимого интервала угловой скорости, присутствует кратковременное ускорение вдоль продольной оси и изменение продольного наклона экскаватора, присутствует последовательная смена значений ускорения, дополнительно состояние  $C_{тр}^D$  идентифицируется принадлежностью пространственных координат к множеству значений, регистрируемых посредством ГНСС. На рис. 2.3. представлен ковш драглайна во время транспортировки на разгрузку.



Рисунок 2.3 – Положение ковша драглайна во время транспортировки на разгрузку

*Транспортировка на черпание* ( $C_{mч}^D$ ) – состояние, при котором привод подъема натягивает трос, происходит подъем ковша, привод тяги ослабляет трос для подготовки ковша к заброске в забой. Для  $C_{mч}^D$  характерно  $\omega_{op} < \omega_n \leq \omega_{mч}$ , где  $\omega_{mч}$  – верхняя граница допустимого интервала угловой скорости  $C_{mч}^D$ . Состояние  $C_{mч}^D$  идентифицируется принадлежностью пространственных координат к определенному множеству значений, регистрируемых посредством ГНСС.

*Вспомогательные операции* ( $C_{всн}^D$ ) – состояние, при котором производится служебные технологические операции (подготовка технологической площадки для шагания). Представляет собой комбинацию повторяющихся состояний «черпание», «разгрузка», «транспортировка на разгрузку», «транспортировка на погрузку» через малые ( $t_{всн}$ ) временные интервалы в случайном порядке. Угловая скорость платформы удовлетворяет условию  $\omega_{op} < \omega_n \leq \omega_{всн}$ , где  $\omega_{всн}$  – верхняя граница допустимого интервала угловой скорости  $C_{всн}^D$ , характерна хаотичная последовательность изменения ускорений МА.

*Шагание* ( $C_{шаг}^D$ ) – состояние, при котором выполняется смена текущей рабочей позиций драглайна, функционирует только механизм перемещения опорных лыж. Для состояния характерно наличие нормального ускорения, действующего вдоль продольной оси платформы экскаватора и кратковременное изменение углов наклона платформы экскаватора, косвенным признаком является линейное последовательное изменение пространственных координат, регистрируемых блоком ГНСС. Особенность состояния заключается в том, что силовые приводы тяги, подъема, поворота платформы задействуются только во время подготовки к шаганию.

*Переналадка* ( $C_{пер}^D$ ) – состояние, при котором драглайн отключен от сети электропитания, выключены все приводы, и угловая скорость платформы удовлетворяет условию  $\omega_{op} < \omega_n$ , отсутствует изменение ускорения, присутствует логическое суждение об отсутствии бортового электропитание ( $U_{борт} = \text{ложь}$ ).

Данное состояние может быть включено оператором посредством отправки служебной команды к блоку АСМП.

*Вспомогательное состояние – не определено ( $C_{но}^D$ )* – состояние, при котором зафиксировано наличие угловой скорости  $\omega_{op} < \omega_n$  и изменение пространственных координат. Присутствует логическое суждение об отсутствии бортового электропитания ( $U_{борт} = \text{ложь}$ ). Вспомогательное состояние предполагает случайное или целенаправленное нарушение работы АСМП.

### ***Основные рабочие состояния мехлопат при выполнении ТПЭ***

Рассмотрим технологические состояния, характерные для экскаваторов серии ЭКГ (мехлопата). Основные технологические состояния данных ГТМ аналогичны технологическим состояниям драглайнов с некоторыми отличиями.

*Холостой ход ( $C_{xx}^M$ )* – состояние, при котором не задействованы силовые приводы поворота, напора и подъема канатов ковша. Остальные характерные признаки аналогичны состоянию  $C_{xx}^D$ .

*Копание ( $C_{\kappa}^M$ )* – состояние, при котором одновременно задействуются приводы напора и подъема ковша. Заведение ковша в забой осуществляется поворотом платформы мехлопаты. Перед началом копания горной массы ковш опускается в нижнее положение, происходит запираение днища ковша. Копание горной массы осуществляется ковшом снизу вверх. Для технологического состояния характерными признаками является: отсутствие угловой скорости по оси рысканья ( $\omega_{op} \approx \omega_n^M$ ), изменение углов наклона экскаватора вдоль продольной оси, последовательная смена ускорений, наличие продолжительной вибрации, косвенным признаком является принадлежность пространственных координат к определенному множеству значений.

*Транспортировка на разгрузку* ( $C_{mp}^M$ ) – состояние, при котором задействован силовой привод механизма поворота. Остальные характерные признаки аналогичны  $C_{mp}^D$ .

*Разгрузка* ( $C_p^M$ ) – состояние, при котором одновременно задействованы приводы напора и подъема. Происходит выгрузка горной массы в транспортную ГТМ открытием днища ковша посредством ослабления троса приводом тяги. Характерными признаками является отсутствие угловой скорости ( $\omega_{op} \approx \omega_n^M$ ), изменение углов наклона платформы вдоль продольной оси, принадлежностью пространственных координат к определенному множеству значений.

*Транспортировка на копание* ( $C_{ткон}^M$ ) – состояние, в котором задействованы силовые приводы механизма тяги и поворота. Они используются для опускания ковша при подготовке к новому циклу копания. Остальные характерные признаки аналогичны  $C_{тч}^D$ .

*Смена позиции* ( $C_{сн}^M$ ) – состояние, при котором задействован гусеничный привод для перемещения по технологическому участку. Характерными признаками является отсутствие угловой скорости ( $\omega_{op} \approx \omega_n^M$ ), наличие сильной вибрации, дополнительным признаком является линейное изменение пространственных координат.

*Переналадка* ( $C_{пер}^M$ ) – состояние аналогично  $C_{пер}^D$ .

*Вспомогательное состояние – не определено* ( $C_{но}^M$ ) аналогично  $C_{но}^D$ .

Характерные признаки технологических (рабочих) состояний не обладают абсолютной достоверностью из-за особенностей функционирования МЭМС - датчиков и ГНСС. Методы нивелирования ошибок МЭМС-датчиков посредством комплексующих фильтров и уменьшение ошибки идентификации технологических состояний является одной из задач данного исследования.

В принятом подходе мониторинга ТПЭ ГТМ используется принцип редукционизма, который исключает некоторые операции ТПЭ, но общая картина функционирования ГТМ позволяет проследить все механизмы протекающего

ТПЭ. В ТПЭ осуществляются некоторые допущения и исключаются данные, которые позволяют повысить точность определения рабочего состояния ГТМ и характеристик ТПЭ в силу требований заказчика и унификации разрабатываемой АСМП.

Выполняются следующие допущения:

- поворотная платформа и стрела рассматриваются как монолитное тело;
- стрела ГТМ является абсолютно жестким телом;
- ковш ГТМ рассматривается как материальная точка без учета индивидуальных геометрических характеристик;
- исключено влияние воздушной среды на ковш и платформу ГТМ;
- логическое суждение о наличии или отсутствии бортового электропитания выполняется исходя из состояния подсистемы питания.

Приняты следующие обозначения углов (поворота) ориентации, соответствующих углам Эйлера, которые описывают ориентацию ГТМ относительно нормальной системы координат:

- ось рысканья (курс) – угловая ориентация центра масс платформы ГТМ вокруг вертикальной оси;
- ось тангажа – угловая ориентация между продольной осью платформы ГТМ и плоскостью горизонта;
- ось крена – угловая ориентация платформы ГТМ вдоль продольной оси относительно вертикальной плоскости. Чувствительные оси МГ совпадают с принятыми углами поворота, чувствительные оси X и Y МА соответствуют принятым углам тангажа и крена, ось Z не соответствует оси рысканья, а направлена перпендикулярно горизонту. Графическое представление углов крена, тангажа и рысканья представлено на рис. 2.4.

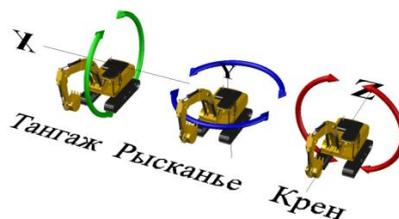


Рисунок 2.4 – Графическое представление углов крена, тангажа и рысканья

При рассмотрении ТПЭ исключаются следующие данные:

- сила натяжения канатов тяги/напора и подъема;
- токи цепей генераторной группы, силовых агрегатов и приводов;
- электрические характеристики двигателей и силовых устройств управления двигателями.

### ***Технология выемки и разгрузки горной массы ГТМ***

Рабочие границы пространства, в которых осуществляется перемещение ковша, определяются конструктивными, динамическими особенностями, а так же характеристиками породы и рельефа рабочей площадки.

В технической документации и технологических картах, регламентирующих выполнение ТПЭ, усредненный угол поворота драглайнов и мехлопат от забоя к месту разгрузки равен  $135^\circ$  [133].

*Операции рабочего цикла драглайна* выполняются в следующем порядке: заброс ковша в забой, установка ковша в рабочее положение, черпание, выведение ковша из забоя, транспортировка к месту разгрузки, разгрузка, транспортировка на черпание (поворот к забою). Операция опускания ковша в забой и выведение его из забоя совмещается с поворотом экскаватора. При перемещении породы в отвал возможна разгрузка ковша без остановки экскаватора, который делает поворот на угол, близкий к  $360^\circ$  градусам. В этом случае продолжительность цикла уменьшается, так как разгрузка ковша совмещается с поворотом экскаватора и осуществляется без его остановки для смены направления поворота.

*Операции рабочего цикла мехлопат* выполняются в следующем порядке: заведение ковша в забой, установка ковша в рабочее положение, копание, выведение ковша из забоя, поворот к месту разгрузки, разгрузка, транспортировка на копание (поворот к забою).

Операция «установка ковша в рабочее положение» для экономии времени может выполняться во время операции «транспортировка на копание». Разгрузка выполняется в грузовой технологический транспорт.

*Схемы работы ГТМ.* Графическое представление траектории движения ковша драглайна при выполнении операции ТПЭ представлено на рис. 2.5.

Схема работы драглайна в забое представлена на рис. 2.6.

Графическое представление траектории движения ковша мехлопаты при выполнении операции ТПЭ представлено рис. 2.7.

Схема работы мехлопат в траншейном забое с погрузкой в технологическое транспортное средство приведена на рис. 2.8.

Подробное описание технологических схем работы ГТМ представлено в следующей литературе [134, 135].

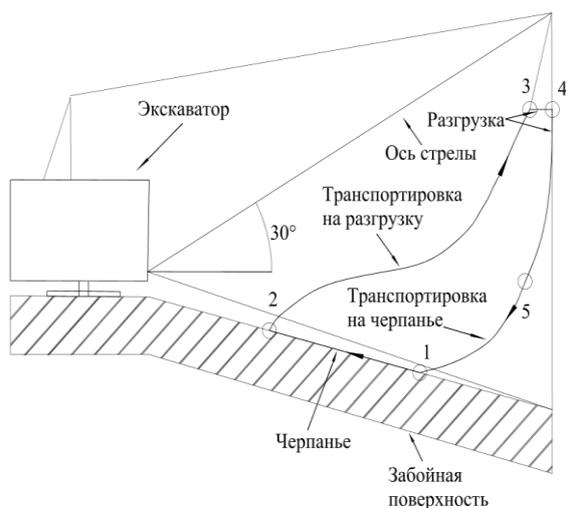


Рисунок 2.5 – Операции технологического перемещения ковша драглайна в забое

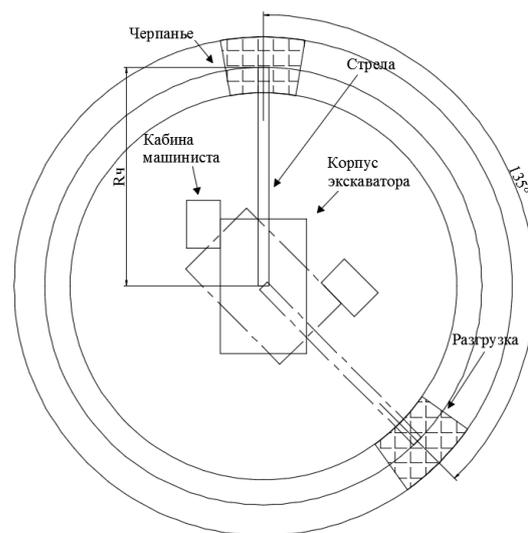


Рисунок 2.6 – Схема работы драглайна в забое при перевалке горной массы из забоя в отвал

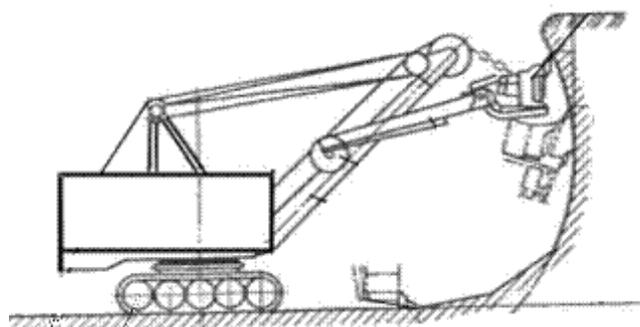


Рисунок 2.7 – Операции копания  
мехлопаты

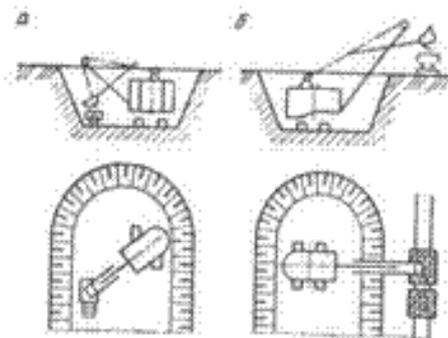


Рисунок 2.8 – Схема работы  
мехлопат в траншейном забое с  
погрузкой

## 2.2 Графическое представление ТПЭ ГТМ

ТПЭ в условиях открытых горных работ характеризуется циклической последовательной сменой рабочих состояний ГТМ в следующем порядке: черпание/копание (1) – транспортировка на разгрузку (2) – разгрузка (3) – транспортировка на черпание/копание (4) [136, 137].

Процесс ТПЭ драглайна представлен в виде связного графа, изображённого на рис. 2.9, ТПЭ мехлопаты представлен в виде связного графа, изображенного на рис. 2.10.

Каждая вершина связного графа представляет собой определенное состояние технологического процесса. Взаимосвязь между состояниями представлена повторяющимися переходами между вершинами графа состояний, который характеризует технологическое состояние драглайнов и мехлопат.

Граф состояний описывает технологический процесс экскавации и содержит ориентированный граф по точкам 1–2–3–4–1.

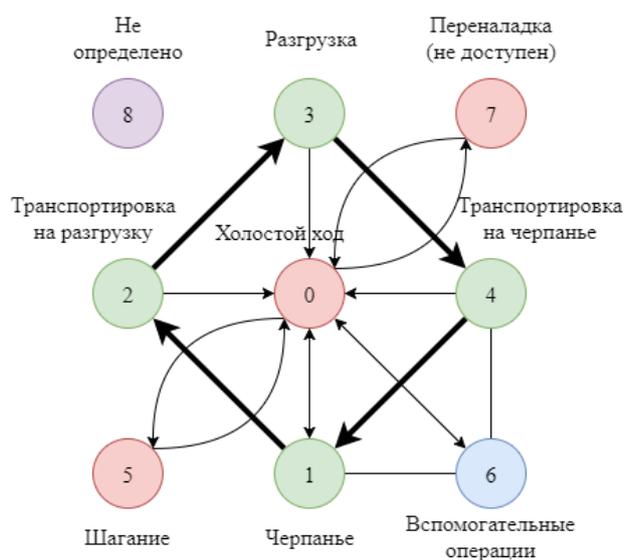


Рисунок 2.9 – Граф состояний ТПЭ драглайна

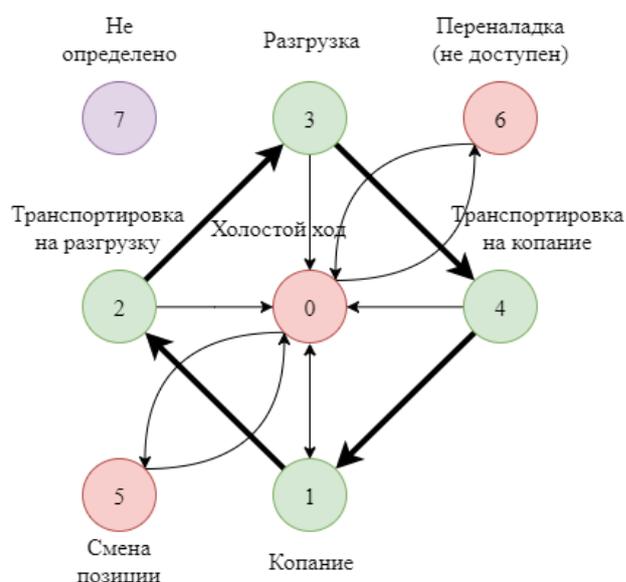


Рисунок 2.10 – Граф состояний ТПЭ мехлопаты

Состояние "холостой ход" соединено ребрами со всеми состояниями, поскольку вынужденная остановка ГТМ возможна в любой момент, прервав выполнение любой технологической операции.

Состояние «вспомогательные операции» характерно только для драглайнов, которое описывается позицией 6. Вспомогательные операции могут начинаться и завершаться операциями: «холостой ход», «черпанье» или «транспортирование на черпанье», поэтому вершина 6 соединена ребрами с соответствующими вершинами 0, 1, 4 графа.

Состояние «шагание/смена позиции» начинается и заканчивается после остановки главных механизмов, поэтому вершина 5 связана ребром только с точкой 0.

Состояние «переналадка» или «недоступен» может наступить только после полной остановки платформы и всех силовых приводов.

Состояние «недоступен» может произойти из любого состояния.

Состояние «не определено» является вспомогательным из-за особенностей функционирования АСМП и может произойти в любой момент времени.

Характерным признаком завершения текущей итерации выполняемого технологического цикла является переход из состояния «транспортировка на

черпание/копание» в любое из состояний «черпание/копание», «вспомогательные операции», «холостой ход», «переналадка». Определенное распознавание функционального состояния процесса экскавации позволяет определить технологические параметры процесса экскавации за конечный промежуток времени.

## 2.3 Основные режимы работы АСМП

### *Архитектура АСМП*

Архитектура АСМП представляет собой систему сбора, обработки, хранения, передачи данных и принятия решения об эффективности работы экскаватора. Система состоит из четырех программных уровней (системный уровень, нижний программный уровень, средний программный уровень, высший программный (командный) уровень) и одного аппаратного уровня [138,139].

Такая архитектура АСМП более предпочтительная с точки зрения практической реализации, поскольку позволяет быстро адаптировать целый программный уровень в зависимости от выполняемой задачи или используемой технологической машины.

Аппаратный уровень представляет собой физический уровень системы, на котором расположены модули и периферийные устройства.

В состав аппаратного уровня счетно–решающего устройства входят: порты ввода–вывода общего назначения (GPIO), таймеры (в том числе, устройства захвата и сравнения), последовательный периферийный интерфейс (SPI), универсальный последовательный синхронно–асинхронный приемопередатчик (USART), последовательная асимметричная шина (IIC), сторожевой таймер (WDT).

*Системный уровень* осуществляет взаимодействие программного обеспечения АСМП с аппаратным уровнем, обеспечивает работу модулей и

периферийных устройств. Системный уровень представляет набор специальных программ – драйверов и базовых программ.

*Нижний уровень* программного обеспечения осуществляет сбор, проверку целостности и достоверности, предварительную обработку данных, полученных с датчиков, вводит коэффициенты размерности измеряемых величин. Данные, прошедшие предварительную обработку с введенными коэффициентами размерности, дополняются маркерами статусов и становятся входными переменными среднего уровня. Схема алгоритма подготовки данных МА, МГ и ГНСС нижнего уровня представлена на рис. 2.11.

Нижний уровень представляет собой набор базовых программ контроля, проверки и коммуникации данных.

*Средний уровень* осуществляет расчет основных временных параметров ТПЭ, предварительную корректировку и отбраковку показаний МА, МГ и ГНСС, обработку пространственных координат, осуществляет работу комплексирующего фильтра, анализ стабильности функционирования МА, МГ и ГНСС.

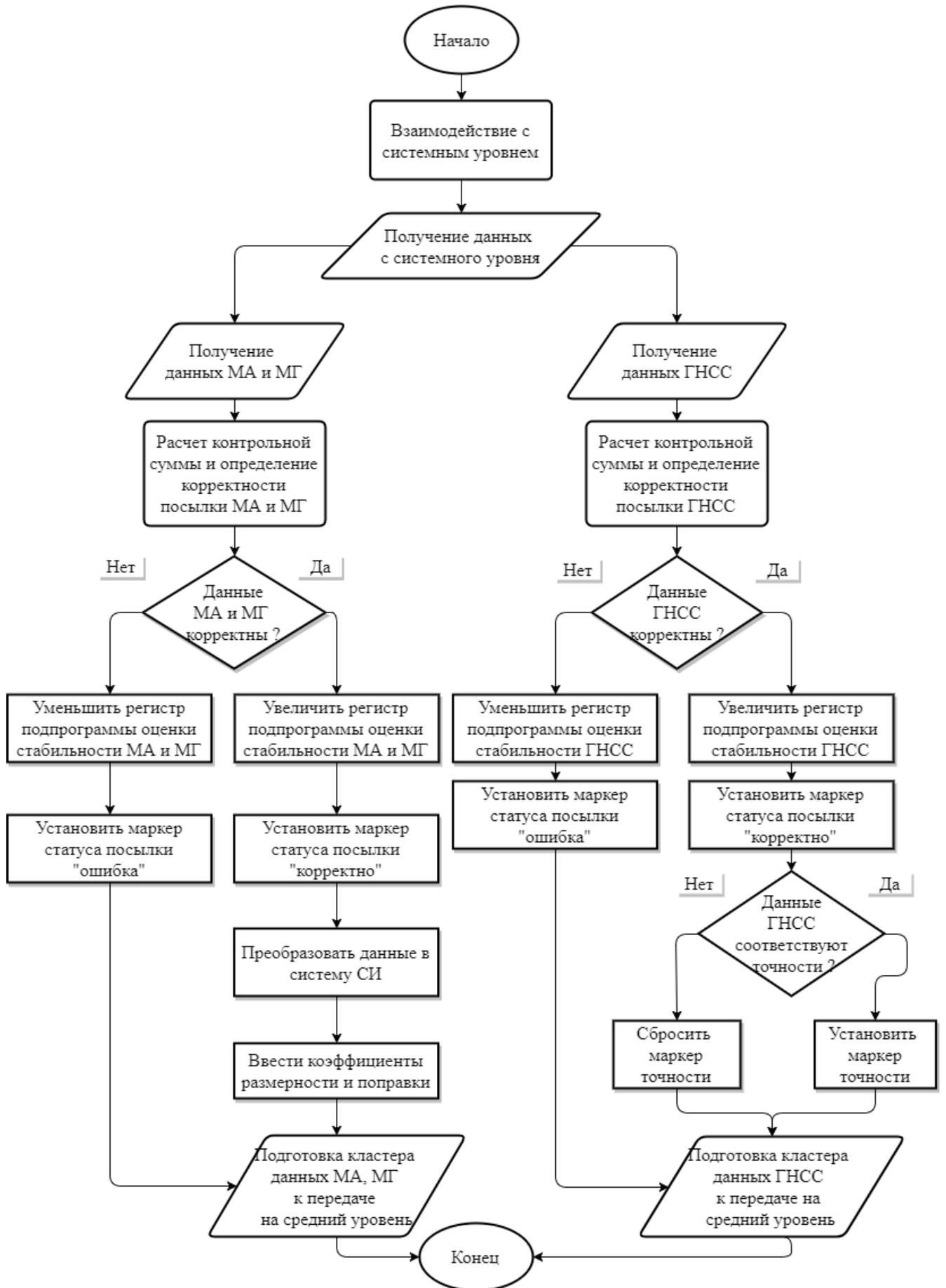


Рисунок 2.11 – Алгоритм подготовки данных МА, МГ и ГНСС нижнего уровня

На основе анализа стабильности данных принимается решение об использовании комплексированного фильтра, реализации AHRS или MARG. Программа представляет собой многоуровневый ветвящийся псевдопараллельный алгоритм. Основная часть программы подготовки кластера данных МА и МГ, ГНСС для передачи комплексированному фильтру Маджвика представлена на рис. 2.12; она выполняется после завершения фрагмента оценки МГ и МА, представленной на рис. 2.13; завершение фрагмента программы подготовки данных ГНСС представлено на рис. 2.14.

Средний уровень представляет собой набор программ, ориентированных на цифровую обработку сигналов комплексированным фильтром и работу вспомогательных программ. Данные, полученные на среднем уровне, становятся входными переменными для высшего уровня.

*Высший (командный) уровень* осуществляет анализ и идентификацию рабочих циклов и технологических состояний, расчет временных параметров и коррекции фильтра. На высшем уровне принимаются решения по работе и выдаче рекомендаций, происходит взаимодействие с пользователями, выполняется подготовка данных для хранения в бортовом регистрирующем устройстве и данных для передачи на сервер. Представляет собой набор высокоуровневых программ для принятия решений, расчета эффективности работы ГТМ.

Общая структура уровней программного обеспечения АСМП представлена на рис. 2.15.

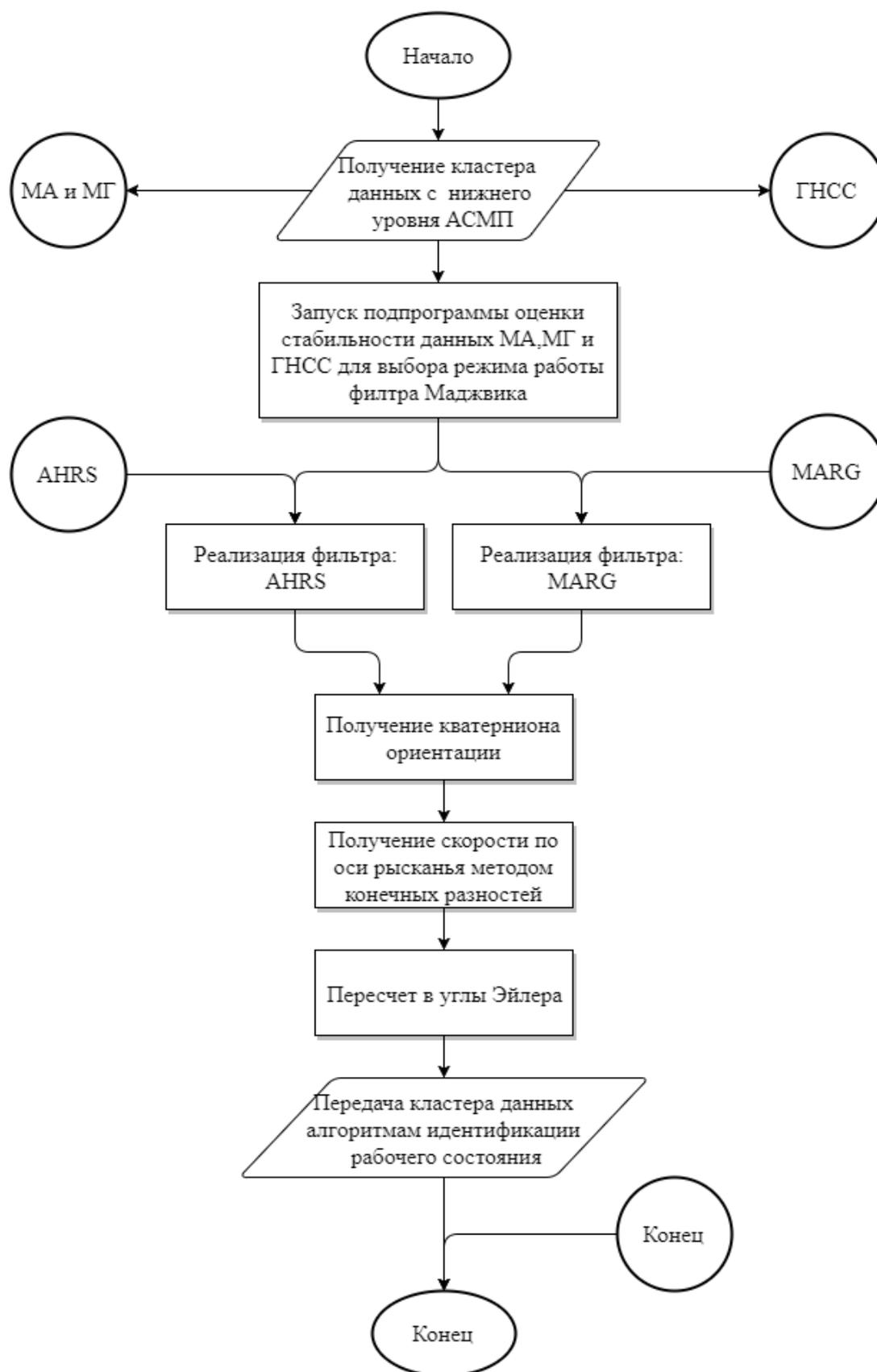


Рисунок 2.12 – Основная часть программы подготовки кластера данных МА и МГ, ГНСС для передачи комплексирующему фильтру Маджвика

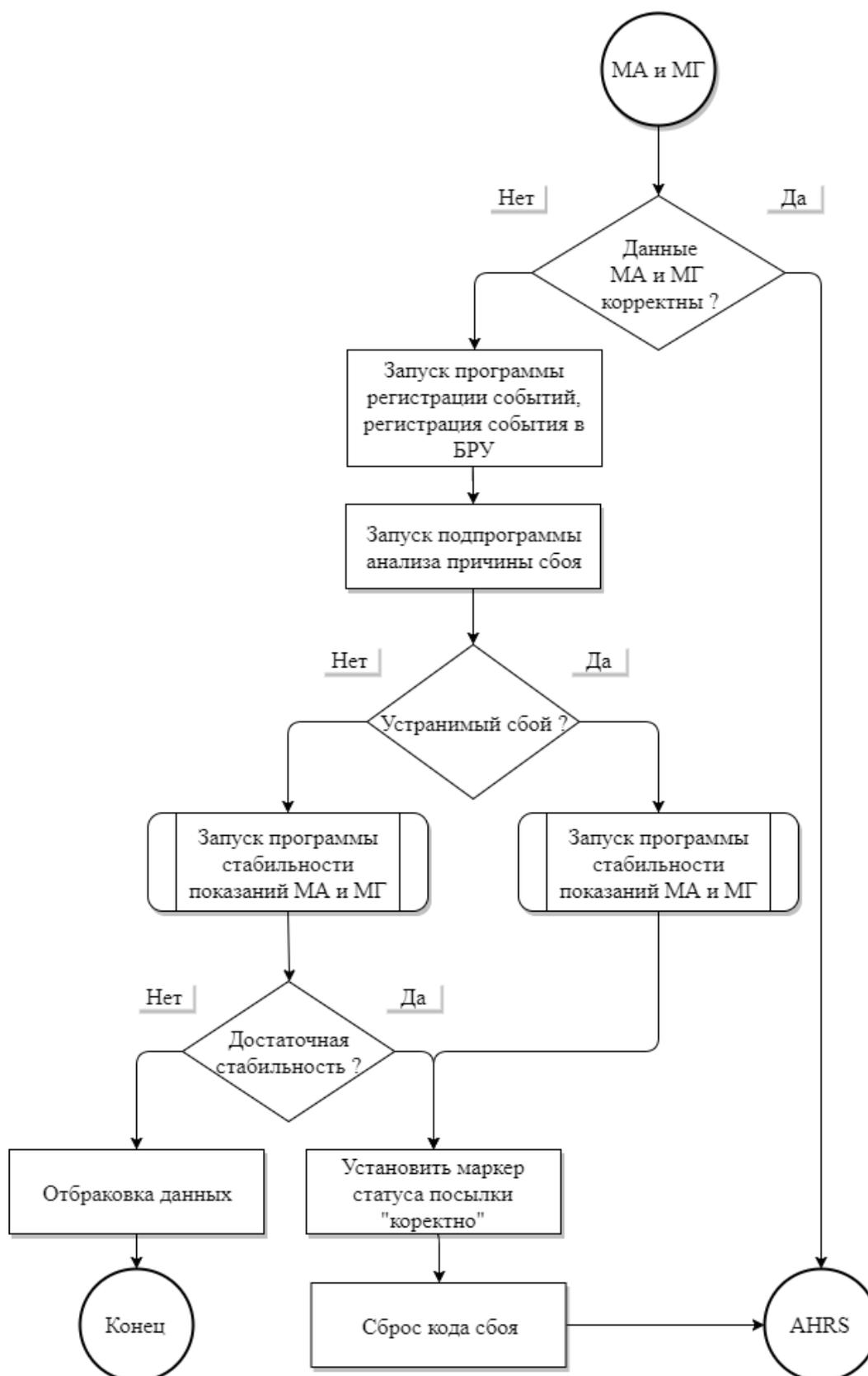


Рисунок 2.13 – Часть программы подготовки данных для передачи комплексирующему фильтру Маджвика (фрагмент подготовки данных МА и МГ)



Рисунок 2.14 – Часть программы подготовки данных для передачи комплексующему фильтру Маджвика (фрагмент подготовки данных ГНСС)



Рисунок 2.15 – Структура уровней программного обеспечения АСМП

### *Режимы работы АСМП*

Разрабатываемая АСМП предназначена для выполнения мониторинга в режиме активного информационного сопровождения (советчика), в случае необходимости возможно расширение функциональных возможностей для работы в режиме супервайзера [140].

АСМП функционирует в режиме активного информационного сопровождения, информируя машиниста о превышении допустимой угловой скорости платформы и ориентации ГТМ, о запрещенных режимах работы, вхождения в запрещенную зону, синхронизации работы с другими ГТМ, о наличии объектов в запрещенной зоне вокруг бортов и ассистирования при горизонтировании платформы ГТМ.

На сервер к оператору, помимо информации о режимах работы, передается информация о текущей производительности и выполняется анализ эффективности работы экскаватора.

Функционирование АСМП в режиме супервайзера возможно при оснащении дополнительным блоком управления, который подключается к АСМП и вводится в контур системы управления экскаватором. Функционирование в режиме супервайзера крайне затруднительно, поскольку требует сертификации АСМП у специализированных надзорных органов или завода изготовителя.

*Режим горизонтирования* – процесс установки платформы ГТМ в горизонтальное положение с целью снижения нагрузки на элементы и механизмы ГТМ для работы в разрешенных режимах эксплуатации.

Горизонтирование осуществляется после выполнения начального базирования телеметрического модуля АСМП перед началом выполнения ТПЭ. Режим горизонтирования включается автоматически при смене места дислокации ГТМ или ручным способом. В режиме горизонтирования на информационной панели АСМП отображаются текущие углы наклона по осям крена и тангажа, при допустимых углах ориентации загорается зеленый индикатор,

свидетельствующий о разрешенной ориентации, при нахождении ГТМ в запрещенной угловой ориентации загорается красный индикатор.

В режиме контроля динамических величин ГТМ АСМП контролирует принадлежность текущей угловой скорости  $\omega_k$ , ускорения  $A_x, A_y, A_z$ , углы наклона платформы ГТМ к допустимому интервалу, определяемому администратором или диспетчером, в случае работы в запрещённом диапазоне динамических величин происходит информирование машиниста и запись события в бортовое регистрирующее устройство (БРУ).

В режиме контроля углового поворота ГТМ АСМП осуществляет анализ текущей и разрешенной угловой ориентации направления стрелы, при повороте к запрещенной зоне (кабель, технологическая машина) происходит информирование машиниста, выводится основная информация о запрещенной зоне и генерируются рекомендации по возвращению в разрешенную зону.

В режиме координации работы нескольких ГТМ АСМП осуществляет мониторинг текущего местоположения рабочих органов нескольких ГТМ с целью оценки возможности пересечения их траектории. Режим координации позволяет своевременно информировать машиниста для предотвращения столкновения, что позволяет обезопасить работу и синхронизировать работу нескольких ГТМ на одном участке.

В режим контроля нахождения объектов в запрещенной бортовой зоне серверная часть АСМП выполняет анализ текущих пространственных координат объектов и ГТМ для обеспечения безопасности местонахождения объектов в рабочей зоне ГТМ, информируя машиниста и диспетчера.

В режиме контроля нахождения стрелы ГТМ АСМП осуществляет анализ текущей ориентации стрелы, пространственных координат ГТМ и объектов окружающей инфраструктуры (строений, линий электропередач) для оценки возможного столкновения во время технологического состояния «шагание» или «смена позиции». АСМП обеспечивает информационное сопровождение машиниста о приближении ГТМ на критическую дистанцию с целью соблюдения безопасности.

### ***Регистрируемые данные АСМП датчиков***

АСМП предназначена для выполнения мониторинга ГТМ во время ТПЭ в режиме реального времени посредством циклического сбора данных с датчиков, установленных на объекте мониторинга. Собранные данные подвергаются математической обработке на определенных программных уровнях, в результате которой рассчитываются параметры, являющиеся входными переменными на уровень выше. Данные, считываемые с датчиков, представлены в виде дискретного цифрового сигнала, получаемого через равные промежутки времени.

### ***Описание регистрируемых параметров АСМП***

АСМП выполняет сбор следующих данных с датчиков, установленных на объекте автоматизации (нижний уровень):

- угловая скорость по оси рысканья –  $\omega_z$  (град/с);
- линейные ускорения по осям крена, тангажа и оси Z –  $A_x, A_y, A_z$  (м/с<sup>2</sup>);
- временной интервал выборок –  $t_{\text{выб}}$  (с);
- текущее время и дата, полученная от часов реального времени –  $t_{\text{ЧРВ}}$ ;
- текущее время и дата, полученная от навигационного блока ГНСС –  $t_{\text{ГНСС}}$ ;
- текущие пространственные координаты:
  - широта –  $\Theta$  (градусы и минуты);
  - долгота –  $\Xi$  (градусы и минуты);
  - высота над уровнем моря –  $\Lambda$  (м).
- температура корпуса гироскопа ( $\tau_g$ ) и корпуса акселерометра ( $\tau_a$ ) (°C);
- наличие или отсутствие бортового питания –  $U_{\text{борт}}$  (логический тип).

На основе данных, полученных на нижнем уровне, средний уровень выполняет расчет следующих параметров:

- угловые перемещения по оси рысканья  $\varphi_z$  – (град);

- кватернионы ориентации –  $q_1, q_2, q_3, q_4$ ;
- угловую скорость скорректированную –  $\omega_k$  (град/с);
- углы поправки начального базирования телеметрического блока АСМП на платформу ГТМ по осям крена –  $\alpha_k^0$  (град) и тангажа –  $\alpha_m^0$  (град);
- углы наклона платформы экскаватора по осям крена и тангажа –  $\mathcal{Q}_k$  (град),  $\mathcal{Q}_m$  (град);
- время наработки датчиков МА и МГ с момента запуска –  $t_{МА}, t_{МГ}$ ;

– пространственные координаты;

– скорость изменения ускорений –  $\Delta A_x, \Delta A_y$ ;

– предварительный угол азимута для подпрограммы коррекции –  $Az_{пред}$ ;

На основе данных, полученных на среднем уровне, высший (командный) уровень выполняет расчет следующих параметров:

– время цикла –  $t_u$ ;

– время транспортировки на черпание/копание –  $t_{м.ч}$ ;

– время транспортировки на разгрузку –  $t_{м.р}$ ;

– время черпания/копания –  $t_u$ ;

– время разгрузки –  $t_p$ ;

– время вспомогательных операций –  $t_в$ ;

– время рабочего цикла –  $t_p$ ;

– время холостого хода –  $t_{хх}$ ;

– время цикла переналадки –  $t_{но}$ ;

– угол азимута и угол коррекции –  $Az, Az_{корр}$ ;

– идентификация технологических состояний ГТМ;

– принятие решений;

– подготовка технологической информации к хранению и передаче.

## 2.4 Оценка эффективности работы ГТМ

Для оценки эффективности работы ГТМ необходимо использовать комплексный подход, объединяющий множество доступных значений и параметров, полученных с различных датчиков, с учетом конструктивных и технологических особенностей ГТМ [141].

Комплексная оценка эффективности (экономических параметров) функционирования ГТМ выполняется на основе генеральной совокупности результатов выполнения четырех взаимосвязанных алгоритмов:

- 1) алгоритм оценки геометрических и динамических параметров ТПЭ;
- 2) алгоритм оценки пространственных параметров ТПЭ;
- 3) алгоритм оценки временных параметров ТПЭ;
- 4) алгоритм идентификации технологических состояний ГТМ, который состоит из следующих подпрограмм идентификации рабочих состояний: «холостой ход», «вспомогательные операции», «шагание/смена позиции», «простой (переналадка)», «неопределенный», «транспортировка на черпание/копание», «транспортировка на разгрузку», «разгрузка», «не определено».

Взаимосвязь временных, геометрических, динамических, пространственных показателей и экономических показателей представлена в виде связного ориентированного графа, изображенного на рис. 2.16.

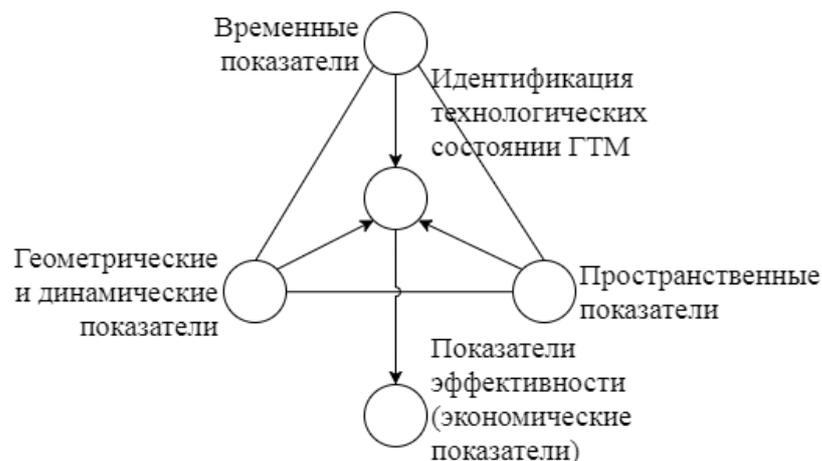


Рисунок 2.16 – Граф взаимосвязи основных технологических параметров

Технологический процесс экскавации ГТМ описывается группой параметров, которые позволяют оценить качество дискретных операций и состоянии экскаватора по точности, темпу, энергии, качеству выполнения за итерацию рабочего цикла или за последовательность выполненных технологических циклов.

### ***Разработка алгоритма оценки геометрических и динамических параметров ТПЭ***

Геометрические и динамические характеристики сведены в одну группу из-за большой взаимосвязи между собой. Оценка динамических параметров, характеризующих ТПЭ, выполняется на основе измерений динамических величин –  $\omega_k, A_x, A_y, A_z$ . Динамические характеристики описывают качество работы ГТМ, на их основе выполняется расчет геометрических характеристик: углов поворота от забоя к отвалу и от отвала к забою, выполняется грубая идентификация рабочих состояний ГТМ.

Динамические и геометрические характеристики позволяют выполнить лишь «грубую» идентификацию, поскольку динамические характеристики не обладают исчерпывающей (неоднозначной) информацией для идентификации таких технологических состояний, как «черпание/копание» и «разгрузка». Характеристики данных состояний прямым образом не измеряются, суждение выполняется на основе косвенных динамических признаков – вибрации и изменения угловой ориентации платформы ГТМ.

Геометрические и динамические параметры, характеризующие технологический процесс экскавации, рассчитываются путем комплексирования показаний угловой скорости ускорений. В результате комплексирования определяются угловые перемещения экскаватора, количество перемещений за единицу времени, углы поворота платформы экскаватора, скорость и ускорения, углы ориентации, с которыми выполнялся технологический процесс.

Оценивается принадлежность величин  $\varphi_z, A_x, A_y, A_z$  к допустимому интервалу. Например,  $\omega_z > 12 \text{ град/с}$  свидетельствует об эксплуатации ГТМ в запрещенном режиме.

### ***Разработка алгоритма оценки пространственных параметров ТПЭ***

Оценка пространственных параметров выполняется на основе измеренных пространственных координат кабины машиниста в пространстве участка блоком ГНСС с последующей обработкой для нахождения ключевых позиций черпание/копание, разгрузка, определение оптимальной траектории движения платформы ГТМ при транспортировке.

Пространственные параметры повышают точность определения динамических и геометрических параметров, на их основе выполняется коррекция комплексирующего фильтра, они представляются как абсолютные координаты нахождения кабины машиниста в пространстве забоя или отвала.

Комбинированная оценка пространственных параметров, совместно с динамическими и геометрическими параметрами, образует синергетический эффект, позволяющий выполнить идентификацию технологического состояния с высокой достоверностью и определить непосредственные углы поворота ГТМ от забоя к отвалу и от отвала к забою, количество операций черпания, разгрузки, количество вспомогательных операций. Пространственные параметры восполняют неоднозначность определения состояния «черпание/копание» и «разгрузка».

Оценка пространственных параметров драглайнов необходима для определения места образовавшегося отвала, поскольку разгрузка может осуществляться в различных областях забоя.

Оценка пространственных параметров мехлопат не целесообразна, поскольку копание горной массы осуществляется из забоя, координаты которого

известны, контроль места разгрузки не требуется, поскольку осуществляется в технологический грузовой транспорт.

### ***Разработка алгоритма оценки временных параметров ТПЭ***

Существующие подходы оценки суточных временных фондов работы ГТМ различают рабочее время и простои, которые подразделяются на плановые и внеплановые. Плановые простои включают: задержки и перерывы в работе, обусловленные ТПЭ и конструктивными особенностями ГТМ, а так же вспомогательными технологическими операциями, затраты на пересмену, смазку и ремонт ГТМ, очистку ковша, подготовку технологических площадок. Внеплановые простои состоят из организационных причин: аварийные ситуации, перебои снабжения, ожидание других технологических машин сверх нормы, задействованных в процессе ТПЭ. При оптимальной организации работы предприятия плановые могут быть значительно нивелированы или вовсе отсутствовать.

Разрабатываемая АСМП способна нивелировать плановые и внеплановые простои путем автоматизированного анализа и учета временных фондов. Суммарный эффективный рабочий фонд времени представляет сумму компонент общего времени экскавации/копания, общего времени вспомогательных работ, общего времени шагания/смены позиции с вычетом общего времени простоев и холостого хода. Суммарный эффективный фонд рабочего времени описывается следующим выражением:

$$T_{\text{раб}}^{\Sigma} = (T_{\text{к/э}}^{\Sigma} + T_{\text{всп}}^{\Sigma} + T_{\text{ш/сн}}^{\Sigma} + T_{\text{тч/к}}^{\Sigma} + T_{\text{мп}}^{\Sigma}) - T_n^{\Sigma}$$

где:

$T_{\text{к/э}}^{\Sigma}$  – компонента общего времени черпания/копания;

$T_{\text{всп}}^{\Sigma}$  – компонента общего времени вспомогательных операций;

$T_{\text{ш/сн}}^{\Sigma}$  – компонента общего времени шагания/смены позиции;

$T_{\text{тч/к}}^{\Sigma}$  – компонента общего времени транспортировки на черпание/копание;

$T_{mp}^{\Sigma}$  – компонента общего времени транспортировки на разгрузку;

$T_n^{\Sigma}$  – компонента общего времени, затраченного на простои.

Учет соответствующей временной компоненты интервала осуществляется отдельно из времени каждого технологического состояния, определяемого по маркеру алгоритма идентификации рабочих циклов.

Отсчет временных компонентов осуществляется программным таймером для каждого идентифицированного технологического состояния ГТМ. В конце смены эффективность работы ГТМ оценивается соответствием временных компонент технологической карте и пропорциональной составляющей каждой компоненты.

При идентификации технологического состояния холостой ход АСМП требует указать тип простоя и в случае поломки указать вид отказов. Важным параметром в оценке экономических характеристик ГТМ является не только оценка суммарного времени простоя, но так же тип и распределение его по времени смены.

### ***Разработка алгоритма идентификации технологических состояний ГТМ***

Алгоритм идентификации технологических состояний предназначен для определения текущего технологического состояния ГТМ. Для повышения точности идентификации используется комплексный подход, заключающийся в использовании генеральной совокупности основных и дополнительных сервисных программ, аддитивного признака окончания цикла ТПЭ.

Основой алгоритма идентификации является процедура декодирования (определения) наступления, завершения и смены технологического состояния ГТМ. Функция декодирования (определения) текущего состояния определяет наличие конъюнкции характерных признаков определенного состояния  $\Psi_m$  из всех возможных состояний –  $\Psi$ .

Для четкого детерминированного вывода о текущем технологическом состоянии ГТМ, АСМП необходимы данные о скорости изменения полученных измерений динамических величин и пространственных координат. Обработанные сигналы с нивелированными ошибками, соответствующие этим данным, доступны на среднем уровне после завершения итерации работы комплексирующего фильтра.

В качестве оценки скорости изменения данных используется конечная разность динамических величин, прошедших обработку комплексирующим фильтром значений:

$$\begin{aligned}\varphi(\zeta_s) - \varphi(\zeta_{s-1}) &= \Delta\varphi(\zeta_s); \\ l_1(\zeta_s) - l_1(\zeta_{s-1}) &= \Delta l_1(\zeta_s); \\ l_2(\zeta_s) - l_2(\zeta_{s-1}) &= \Delta l_2(\zeta_s); \\ s &= 1, 2, \dots\end{aligned}$$

Аддитивным признаком завершения полного рабочего цикла является переход из состояния «транспортировка на черпание/копание» в любое из состояний «черпание», «вспомогательные операции», «холостой ход».

Повышение достоверности анализа идентификации выполняется анализом последовательности смены технологических состояний по ориентированному технологическому циклу 1–2–3–4–1 на графа состояния.

$$\forall_i, \Psi(\zeta_{s+1}) = \Psi_i(\zeta_s) \Leftrightarrow \Psi(\zeta_{s+1}) = \Psi_i(\zeta_{s+1}) \cup \Psi_{i+2}(\zeta_{s+1}) \cup \Psi_{i-1}(\zeta_{s+1})$$

где  $\Psi_i$  – номер циклического состояния.

Алгоритм идентификации состоит из девяти подпрограмм для драглайнов и восьми подпрограмм для мехлопаты.

Идентификация состояния «разгрузка» для драглайнов унифицирована, поскольку сам факт разгрузки оценивается по косвенным признакам, а частоты дискретизации модуля ГНСС иногда не достаточно для различения «разгрузки с остановкой» и «разгрузки без остановки». Поэтому состояние «разгрузка»

идентифицируется конъюнкции основных и косвенных признаков. Граф идентификации рабочих состояний АСМП представлен на рис. 2.15. и 2.16.

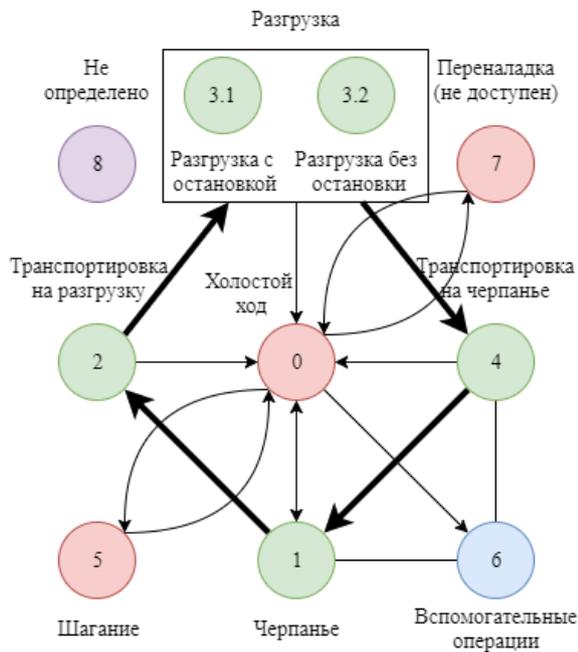


Рисунок 2.17 – Граф состояний ТПЭ драглайна регистрируемый АСМП

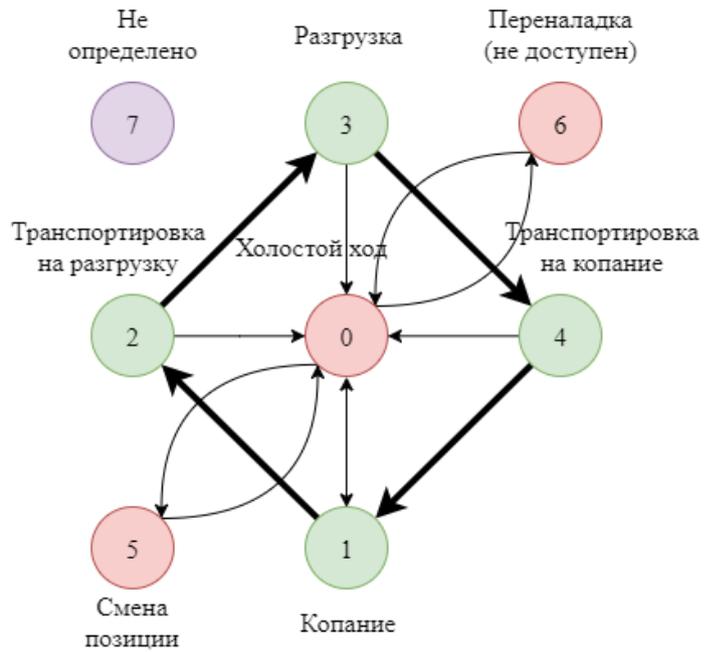


Рисунок 2.18 – Граф состояний ТПЭ мехлопаты регистрируемый АСМП

Алгоритм идентификации технологических состояний функционирует на основе конечной разности скорректированной угловой скорости, ускорений, логического суждения о наличии или отсутствии бортового электропитания, представляет собой многоуровневый ветвящийся алгоритм с выбором нужной ветви в зависимости от текущих показаний. Автор уже имеет наработки в области разработки алгоритмов идентификации технологических состояний ГТМ, которые представлены в [142–143], данный алгоритм является улучшенной версией рассмотренного алгоритма. Схема алгоритма идентификации технологических состояний ГТМ представлена на рис. 2.17–2.22.

Схема начала алгоритма представлена на рис. 2.17, осуществляется получение кластера данных: МА, МГ, ГНСС, логического суждения о наличии или отсутствии бортового электропитания, состоянии рывкового фильтра. Основной для работы алгоритма идентификации является скорректированная угловая скорость, на основе которой выполняется большая часть суждений. Если выполняется первый запуск алгоритма, то задается начальное состояние

«холостой ход», иначе, выполняется расчет конечной разницы скорректированной угловой скорости, на основе которой будет выполнена определенная ветка алгоритма. Всего возможно 3 варианта изменения угловой скорости: без изменений –  $\omega_{би}$ , ускорение –  $\omega_y$ , замедление –  $\omega_3$ , так же возможно отсутствие угловой скорости ( $\omega_n \approx \omega_{op}$ ) –  $\omega_o$ .

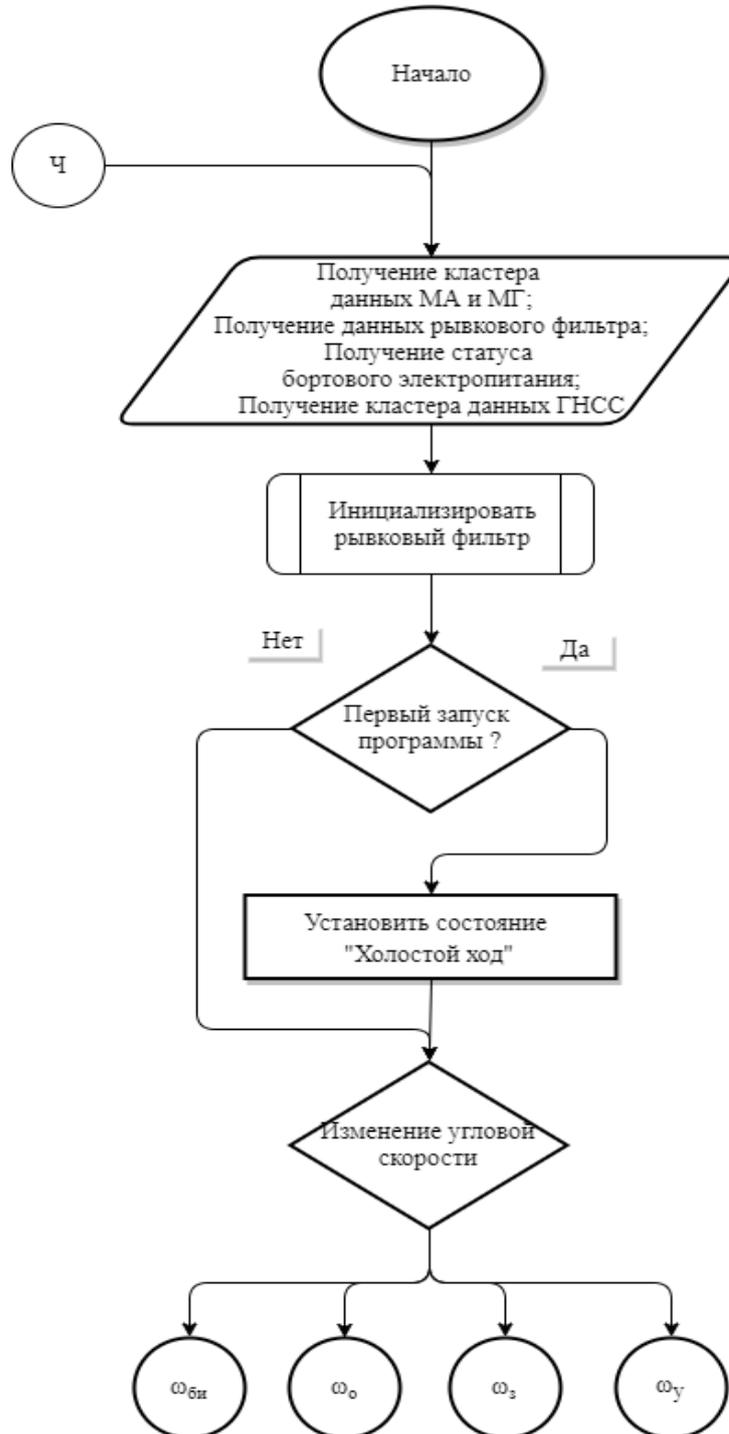


Рисунок 2.19 – Алгоритм идентификации рабочих состояний ГТМ (начало)

Ветвь алгоритма идентификации, представленная на рис.2.18, выполняется при условии отсутствия изменения угловой скорости, что является признаком перехода технологического состояния «черпание» во «вспомогательные операции» и перехода состояния «транспортировка на разгрузку» в «разгрузку». Суждение о прошлом состоянии «транспортировка на разгрузку» свидетельствует о наступлении состояния «разгрузка».

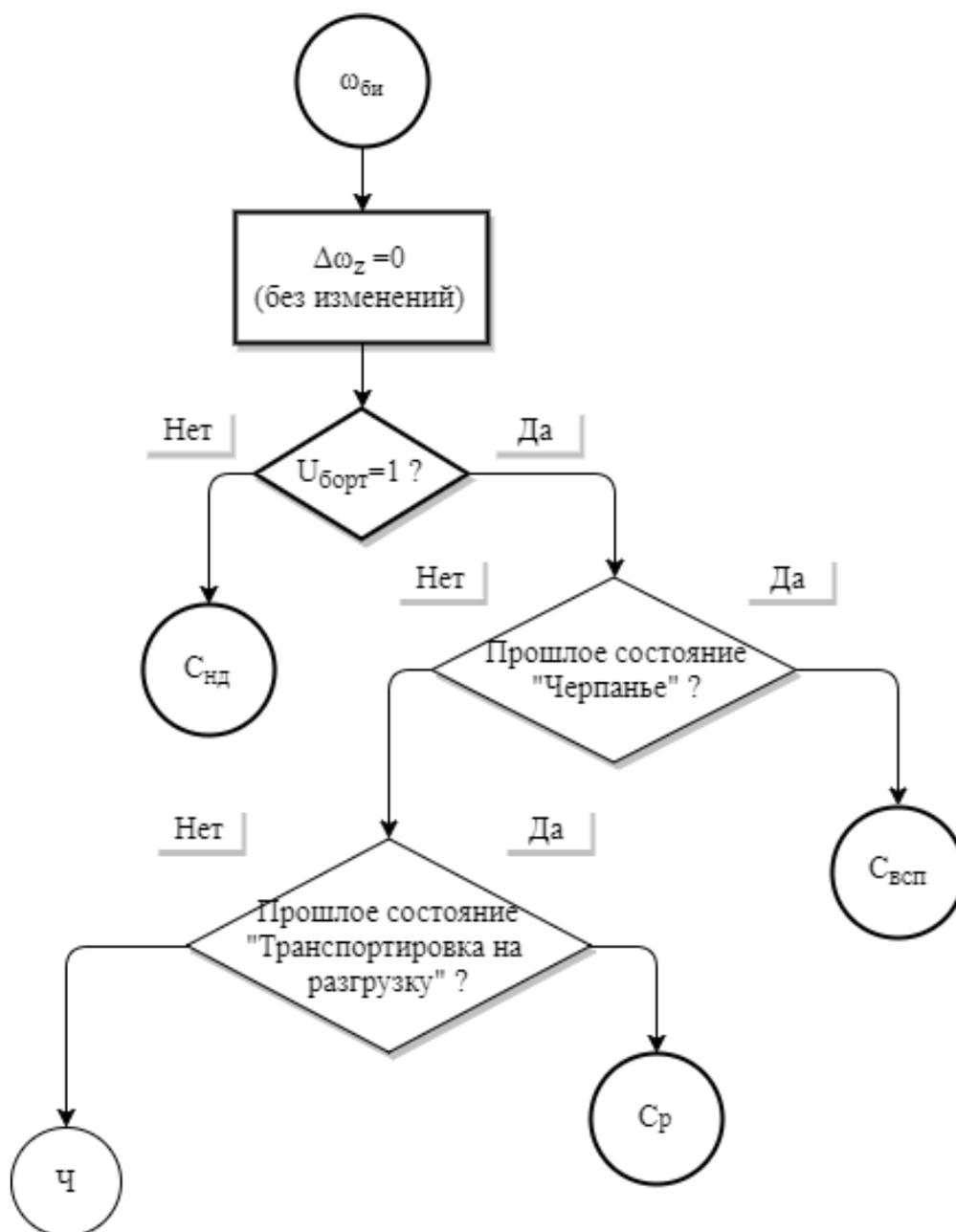


Рис. 2.20. Алгоритм идентификации рабочих состояний ГТМ  
(продолжение при  $\omega_{би}$ )

Ветвь алгоритма идентификации, представленного на рис. 2.19 выполняется при условии  $\omega_3$  платформы ГТМ. Замедление характерно для окончания технологической операции и начала следующей. При замедлении присутствует неоднозначность определения технологического состояния «вспомогательные операции», поэтому используется рывковый фильтр для различения с состояниями «транспортировка на черпание» и «транспортировка на разгрузку».

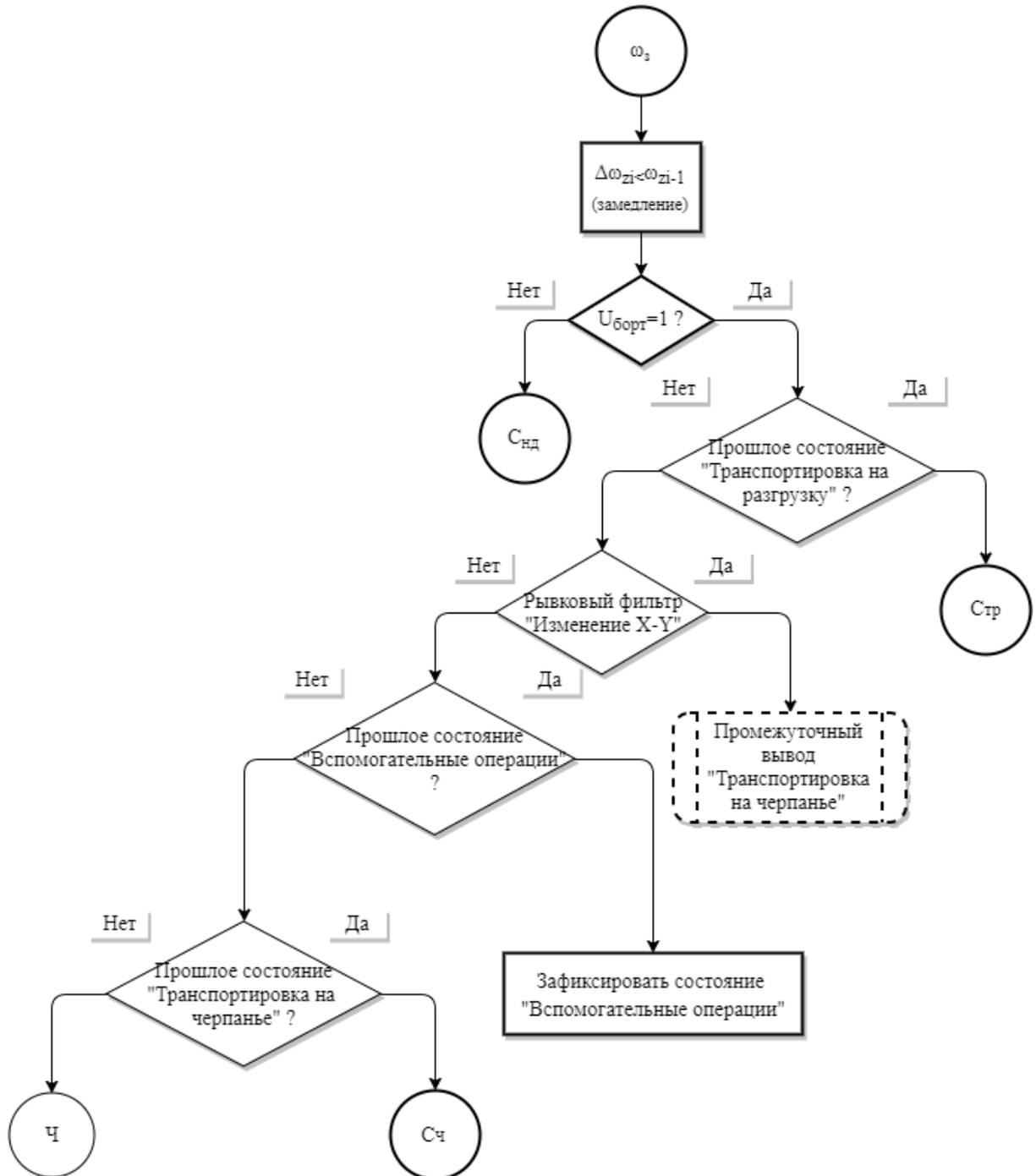


Рисунок 2.21 – Алгоритм идентификации рабочих состояний ГТМ (продолжение при  $\omega_3$ )

Ветвь алгоритма идентификации, представленного на рис. 2.20 выполняется при  $\omega_o$ , что характерно для нерабочего состояния ГТМ, данный признак является основным при идентификации состояний «холостой ход», «переналадка», «не определено».

Идентификация состояния «холостой ход» (простой) выполняется при отсутствии угловой скорости в течение опорного временного интервала  $t_{xx}^H$ , наличия логического суждения о наличии бортового электропитания ( $U_{\text{борт}} = \text{истина}$ ) и динамическим состоянием «покой».

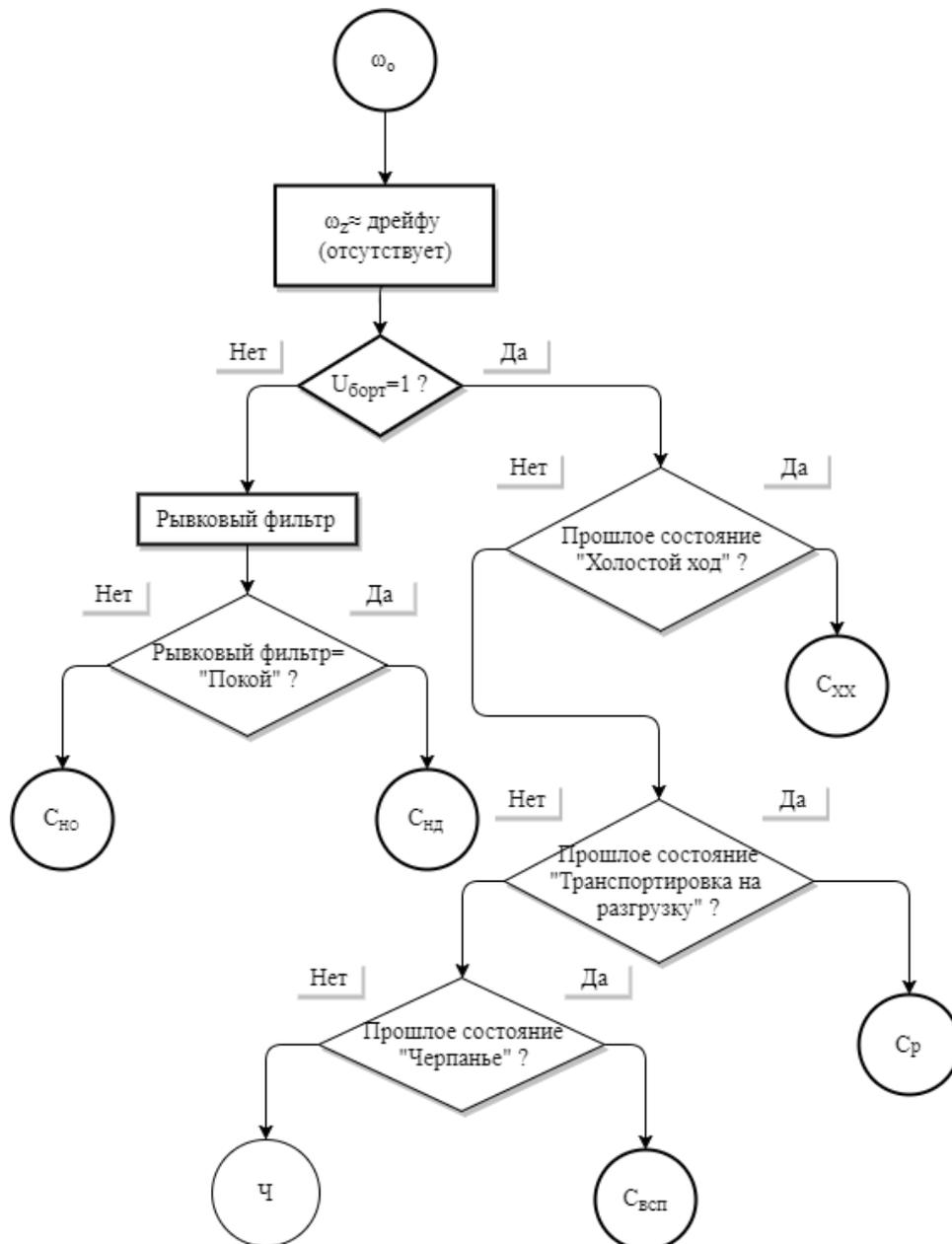


Рис. 2.22 – Алгоритм идентификации рабочих состояний ГТМ (продолжение при  $\omega_o$ )

Идентификация состояния «переналадка» выполняется при отсутствии угловой скорости, наличии логического суждения об отсутствии бортового электропитания ( $U_{\text{борт}} = \text{ложь}$ ) и динамического состояния «покой», при регистрации состояния АСМП сообщает диспетчеру о текущем технологическом состоянии и переходит в режим энергосбережения для экономии заряда аккумулятора.

Ветвь алгоритма идентификации, представленного на рис. 2.21 выполняется при  $\omega_y$ , что характерно для начала состояния, связанного с началом движения ГТМ: «транспортировка на черпание», «транспортировка на разгрузку», «вспомогательные операции».

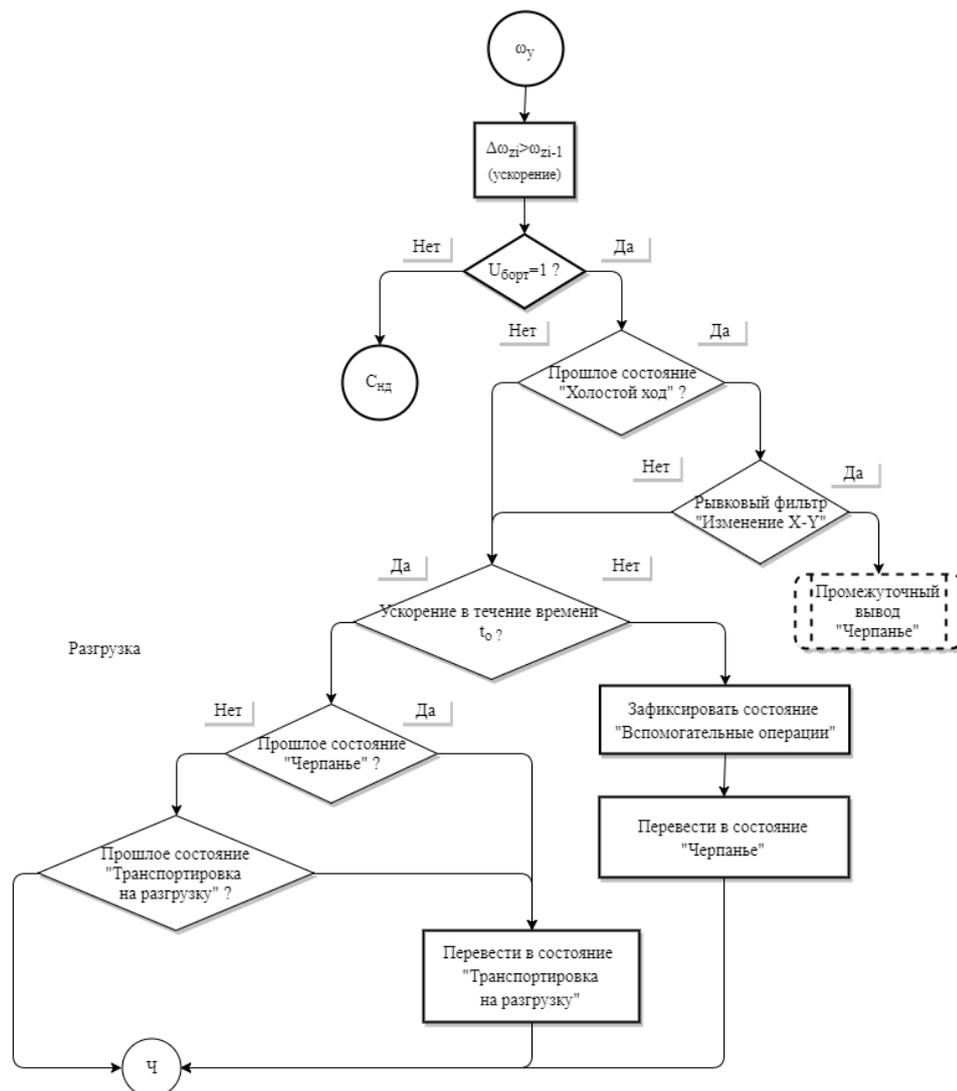


Рисунок 2.23 – Алгоритм идентификации рабочих состояний ГТМ (продолжение при  $\omega_y$ )

Идентификация состояния «не определено» выполняется при  $(\omega_{бу} \vee \omega_y \vee \omega_s) \wedge (U_{борт} = ложь)$ . Идентификация состояния «не определено» предполагает случайное или целенаправленное отключение системы мониторинга. В этом случае происходит регистрация события в бортовое регистрирующее устройство и производится вызов диспетчера для разрешения ситуации.

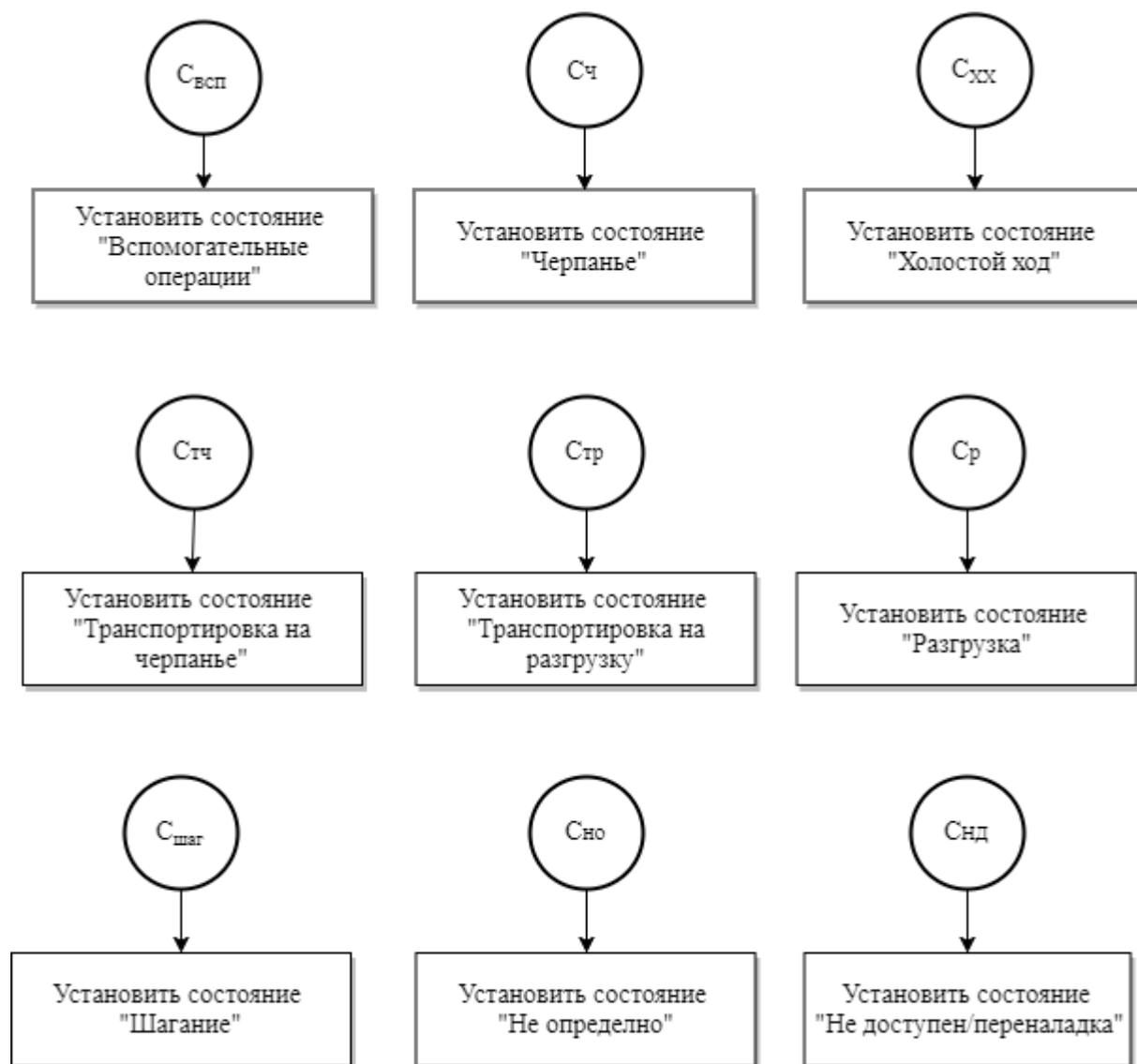


Рисунок 2.24 – Алгоритм идентификации рабочих состояний ГТМ (окончание)

### *Алгоритм оценки эффективности экономических показателей*

Алгоритм оценки эффективности экономических показателей предназначен для оценки эффективности функционирования ГТМ за определенный временной период.

Эффективность работы ГТМ оценивается Заказчиком, согласно внутренним требованиям предприятия, на основе следующих параметров:

- 1) количество рабочих циклов в единицу времени;
- 2) временные характеристики рабочих циклов;
- 3) соотношение эффективного рабочего времени и простоя;
- 4) соотношение временных составляющих ТПЭ;
- 5) динамические характеристики ТПЭ;
- 6) время наработки узлов и агрегатов.

Производится оценка технической производительности экскаватора согласно следующему выражению:

$$P_T = \frac{3600 \times V_{ГТМ} \times K_h}{t_u t_p}, \text{ м}^3/\text{час} \quad ,$$

где:

$K_h$  – коэффициент наполнения ковша ГТМ, постоянная величина равная 0,5;

$t_u$  – длительность цикла ГТМ;

$V_{ГТМ}$  – объем ковша ГТМ ( $\text{м}^3$ );

$t_p$  – коэффициент разрыхления ковша ГТМ.

Эксплуатационная производительность оценивается согласно следующему выражению:

$$P_{\text{Э}} = P_T \times k_{\text{Э}} \quad , \text{ где:}$$

$k_{\text{Э}}$  – коэффициент эксплуатации экскаватора (обычно принимается равным 0,7).

Оценка времени аварийных режимов работы выполняется исходя из условия – не больше 4 % от общего рабочего временного фонда.

Средняя продолжительность рабочего цикла черпания с последующей транспортировкой на разгрузку и разгрузкой составляет 60 секунд.

Непрерывный контроль углов наклона платформы ГТМ по крену и тангажу снижает простои на 2...2,5 % за счет упреждения отрыва базы от основания.

## **2.5 Выводы по второй главе**

1. Исследованы объекты автоматизированного мониторинга – ГТМ драглайн ЭШ10/70 и мехлопата ЭКГ–8И, режимы работы и эксплуатации, их конструктивные, технологические особенности.

2. Разработан способ и алгоритм идентификации основных технологических состояний ГТМ (рабочих циклов), алгоритмов определения геометрических и динамических, пространственных, временных параметров ГТМ. Разработан метод оценки эффективности функционирования ГТМ на основе алгоритма идентификации основных технологических состояний горных машин.

3. Разработаны основные режимы работы АСМП с учетом конструктивных и технологических особенностей ГТМ, определена архитектура, регистрируемые данные, разработана схема АСМП, уровни программного обеспечения и требования к установке блоков АСМП.

4. На основе изученных особенностей ТПЭ, режимов работы, разработанных алгоритмов идентификации технологических состояний ГТМ возможно осуществить разработку АСМП функциональных узлов ГТМ на примере шагающего экскаватора.

### **3 РАЗРАБОТКА АСМП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ПРИМЕРЕ АСМП ШАГАЮЩЕГО ЭКСКАВАТОРА**

#### **3.1 Разработка автоматизированной системы сбора и обработки данных для компьютерной симуляции комплексирующих фильтров**

На основе изученных особенностей ТПЭ, режимов работы, разработанных алгоритмов идентификации технологических состояний ГТМ разрабатывается аппаратно – программного обеспечение автоматизированной системы сбора и обработки данных для компьютерной симуляции комплексирующих фильтров, на основе которой создается АСМП ГТМ с учетом основных требований и ограничений.

Сбор данных для компьютерного моделирования комплексирующих фильтров для программного обеспечения АСМП осуществляется путем измерения в реальных и лабораторных условиях данных, описанных ранее во второй главе диссертации.

Работа по моделированию комплексирующего фильтра Маджвика начинается со сбора данных с МЭМС-датчиков в реальных и лабораторных условиях. После этого осуществляется анализ и предварительная математическая обработка данных, имитация работы комплексирующего фильтра Маджвика.

Автоматизированная система сбора и обработки данных, являющаяся полноценным экспериментальным образцом АСМП, представляет собой набор аппаратно–программных средств, полностью аналогичных аппаратному, системному, нижнему и среднему уровню АСМП.

Структура системы сбора и обработки данных полностью эквивалентна структуре АСМП, используется для отладки и симуляции.

Разработка автоматизированной системы сбора и обработки данных представлена в приложении Е.

## 3.2 Структура АСМП

### *Основные требования к АСМП*

Заказчик предъявляет ряд жёстких требований к разрабатываемой АСМП, которые включают в себя функциональные возможности и режимы функционирования, требования к надежности, отказоустойчивости, ремонтпригодности, персоналу и его квалификации и т.д. Полный перечень требований к разрабатываемой АСМП представлен в техническом задании, которое приведено в приложении В.

Разработка структуры, архитектуры, аппаратного и программного обеспечения АСМП выполняется, исходя из требований к функциональным возможностям, режимам работы и надежности АСМП.

Основные требования к функциональным возможностям АСМП:

- сбор данных о ТПЭ с дальнейшей математической обработкой, хранением и передачей решений потребителю;
- дистанционная передача технологических данных о ТПЭ на сервер. Если передача невозможна, то хранить данные технологического процесса до завершения удачной передачи данных на сервер;
- хранение в бортовом регистрирующем устройстве («черном ящике») данных ТПЭ до востребования в течение определенного времени;
- при необходимости физически извлекать для считывания данные «черного ящика» без полного разбора АСМП;
- сохранение работоспособности при отключении основного бортового питания. В случае незапланированного отключения бортового питания послать сигнал диспетчеру и выполнить указанные команды;
- установка голосовой односторонней, двусторонней или односторонней текстовой связи машиниста с диспетчером в случае необходимости;
- запись данных ТПЭ и регистрация событий с указанием временных меток;

- осуществление принятия сигнала ГНСС для определения текущего местоположения и корректировки внутренних часов;
- взаимодействие с различными устройствами, находящимися на удалении до 10 метров по беспроводному каналу связи для настройки и синхронизации АСМП, для загрузки данных из «черного ящика». Для связи использовать распространённый протокол беспроводной связи, такой как Bluetooth или Wi-Fi;
- осуществление связи по проводному каналу стандарта RS-232, допускается осуществление неполного дуплекса – линий RX, TX, RTS,CTS и передачу питания по сигнальному проводу;
- осуществление связи по проводному дифференциальному каналу стандарта RS-485 с гальванической или оптической развязкой для подключения, в том числе сторонних устройств к АСМП;
- наличие устойчивости к различным физическим и возмущающим воздействиям.

Требования к режимам работы и надежности:

- круглосуточный режим работы;
- время наработки между отказами должно составлять не менее 36 месяцев, время наработки до отказа должно составлять не менее 120 месяцев;
- сохранение работоспособности не менее одного часа при случайном или целенаправленном отключении бортового питания;
- требования к энергосбережению АСМП не предъявляется.

### ***Разработка структуры АСМП для драглайнов и мехлопат***

АСМП состоит из трех основных устройств (блоков), специализирующихся на выполнении определенных функций, расположенных в различных частях драглайна; четвертое устройство АСМП – сервер, расположенный в здании разрезуправления [144].

Состав АСМП:

Первое устройство – основной телеметрический блок, осуществляющий сбор информации с первичных преобразователей (датчиков) и других устройств, математическую обработку, принятие решений и управление работой АСМП в целом.

Второе устройство – информационный блок, осуществляющий коммуникационное взаимодействие между АСМП и сервером, информационное взаимодействие человек–машина с машинистом драглайна. В зависимости от внешних условий и требований предприятия можно в качестве информационного блока использовать планшет или смартфон с установленным специализированным программным обеспечением, коммуникация планшета с АСМП осуществляется посредством беспроводного радиоканала с основным телеметрическим модулем.

Третье устройство – навигационный блок (блок ГНСС), осуществляющий измерение пространственных координат ГТМ спутниковой группировки ГНСС для повышения точности идентификации рабочих состояний и выполнения алгоритмов коррекции комплексирующего фильтра.

Четвертое устройство – сервер на основе персонального компьютера с доступом в интернет по выделенному IP адресу («белый IP») и модулем GSM связи. Разработка сервера не является целью данного научного исследования и выполняется силами Заказчика.

Итак, разрабатываемая АСМП состоит из следующих устройств: основной телеметрический блок, информационный блок, навигационный блок.

*Основной телеметрический блок* имеет в своем составе девять основных подсистем:

- 1) вычислительно–управляющая подсистема основывается на счетно–решающем устройстве на основе модуля ПЛИС или модуля МК;
- 2) подсистема первичных преобразователей (модуль МА, модуль МГ);
- 3) подсистема часов реального времени (часы реального времени);

4) подсистема памяти (модуль бортового регистрирующего устройства (БРУ) («черный ящик»), модуль энергонезависимой памяти для хранения настроек и калибровочной информации);

5) подсистема связи по радиоканалу. Для организации беспроводной связи используются существующие распространенные физические спецификации связи, такие, как Bluetooth или Wi-Fi;

6) подсистема постоянного тока (обособленный понижающий блок питания бортового питания 220 В в диапазоне от 18 до 24 В, 3 А);

7) подсистема питания. Состав и возможности варьируются в зависимости от требований конкретного предприятия (модуль постоянного напряжения 12 В, модуль зарядки литий-ионного (Li-ion) аккумулятора, Li-ion аккумулятор с рабочим напряжением 7,4 В и емкостью не менее 3,5 А×ч, модуль автоматического переключения основного питания на резервное батарейное, понижающий линейный модуль питания 5,0 В, 3,3 В);

8) подсистема промышленной связи на основе модуля связи RS-232;

9) подсистема изолированной связи на основе модуля связи RS-485.

В состав этого блока входят:

1) подсистема коммутации питающего напряжения цепей: модуль силовых коммутационных ключей (опционально).

2) подсистема температурной стабилизации МА и МГ на основе модуля стабилизации температуры (элемент Пельтье) (опциональна);

3) подсистема согласования логических уровней вычислительно-управляющей подсистемы.

Подсистема постоянного тока является обособленной подсистемой и предназначена для создания шины питания для остальных устройств АСМП. На рис. 3.1 представлена структура основного телеметрического блока АСМП, подсистема питания АСМП представлена на рис. 3.2.

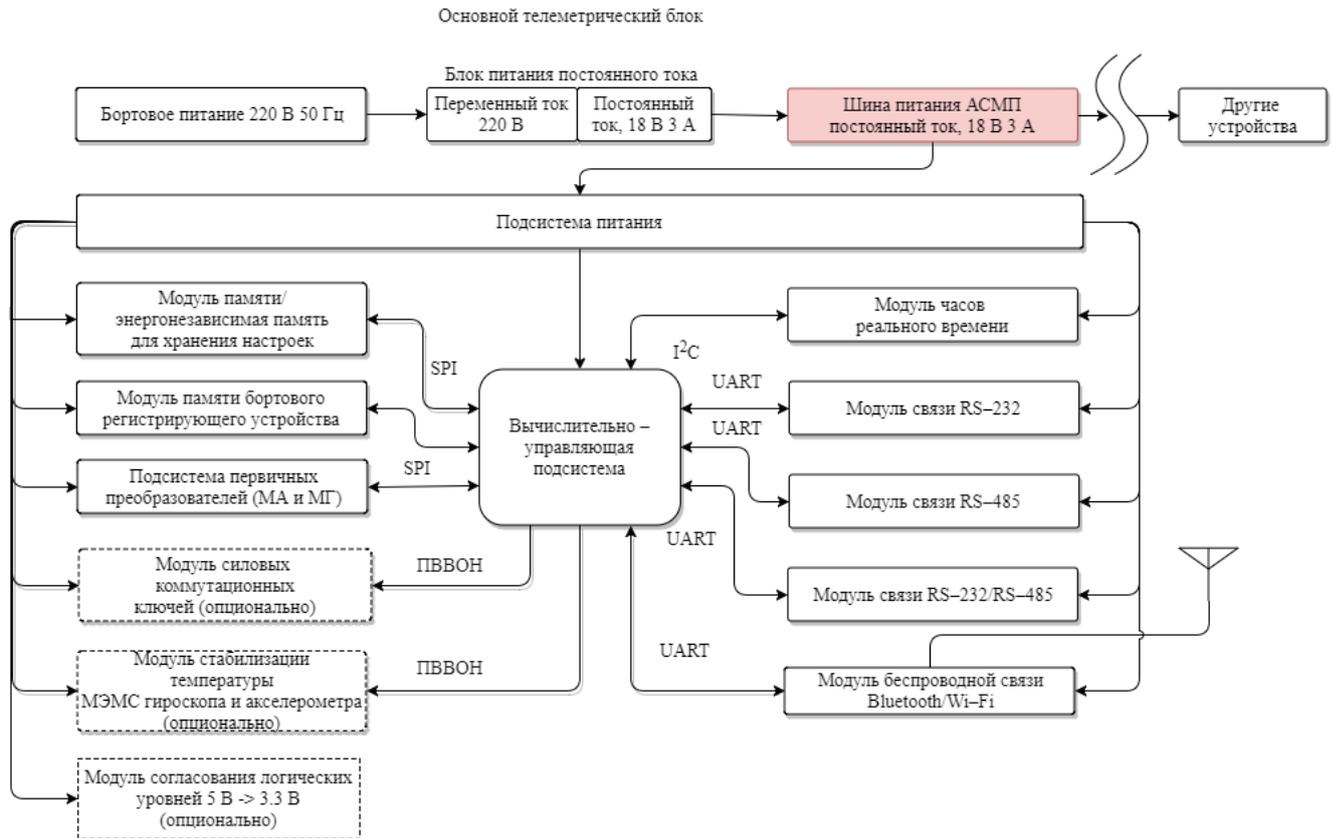


Рисунок 3.1 – Структура основного телеметрического блока АСМП

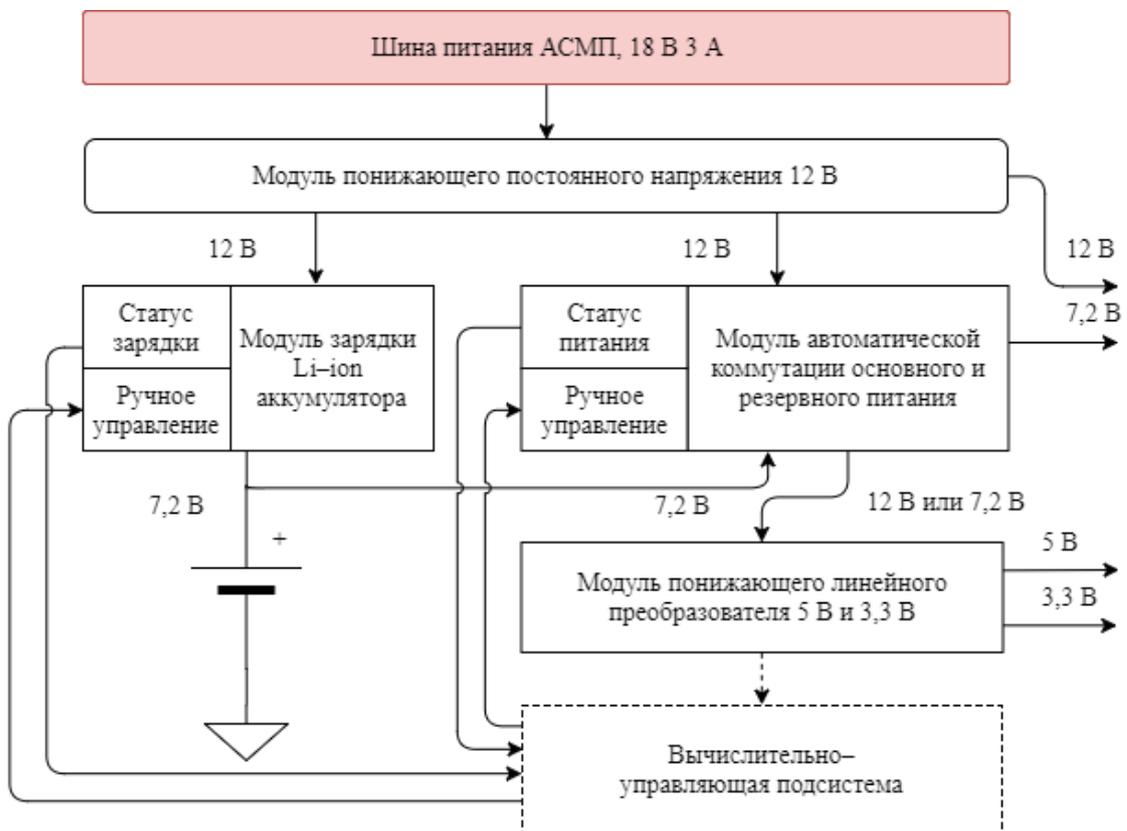


Рисунок 3.2 – Структура подсистемы питания

*Информационный блок* состоит из одного или нескольких модулей и содержит следующие подсистемы:

- 1) вычислительная подсистема на основе модуля МК или ПЛИС;
- 2) подсистема мобильной связи на основе модуля GSM связи с устройствами голосового ввода/ вывода (модуль микрофона и динамика);
- 3) подсистема памяти, в том числе, память буфера приема и передачи информации для работы с GSM модулем (модуль бортового регистрирующего устройства («черный ящик»), модуль энергонезависимой памяти для хранения настроек и калибровочной информации, память буфера приема и передачи информации);
- 4) подсистема аудиовизуального вывода информации на основе модулей (дисплея, динамика или пьезоизлучателя, светодиодного индикатора);
- 5) подсистема контроля физического воздействия на информационный блок на основе модуля МА и МГ;
- 6) подсистема ввода информации на основе модуля ввода (клавиатуры), в том числе кнопка быстрого вызова диспетчера;
- 7) подсистема проводной связи с основным блоком на основе модуля связи RS-232;
- 8) подсистема резервной связи с основным блоком по радиоканалу на основе модуля беспроводной связи;
- 9) подсистема питания;
- 10) подсистема радиочастотной идентификации RFID (Radio Frequency IDentification) (опциональна) на основе модуля RFID;
- 11) подсистема коммутации питающего напряжения цепей: модуль силовых коммутационных ключей (опционально).

Таким образом, информационный блок имеет в своем составе девять основных подсистем. Структура информационного блока АСМП представлена на рис.3.3.

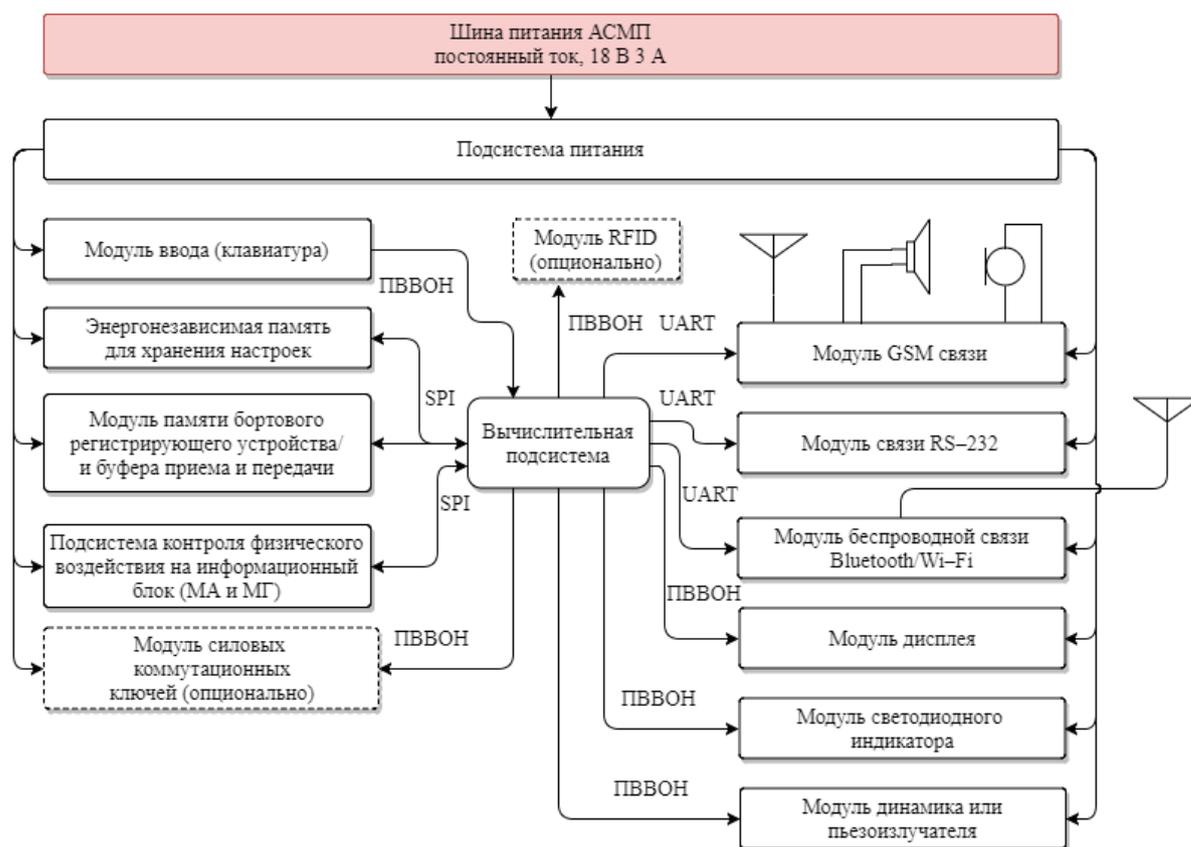


Рисунок 3.3 – Структура информационного блока системы АСМП

Блок ГНСС состоит из одного или нескольких модулей, реализация блока ГНСС зависит от используемого навигационного блока ГНСС; возможна реализация с навигационным блоком, работающим с текстовым или бинарным протоколом NMEA. В случае использования блока с бинарным протоколом целесообразно применение вычислительного модуля и модуля промышленного стандарта связи RS-485 вместо RS-232.

Блок ГНСС имеет в своем составе следующие подсистемы, состоящие из одного или нескольких модулей:

- 1) подсистема спутниковой навигации на основе модуля ГНСС;
- 2) подсистема проводной связи с основным блоком на основе модуля связи RS-232 или RS-485;
- 3) подсистема питания;
- 4) вычислительная подсистема на основе модуля МК или ПЛИС при бинарном протоколе модуля ГНСС;

Структура блока ГНСС АСМП с текстовым протоколом NMEA изображена на рис. 3.4, с бинарным протоколом изображена на рис. 3.5.

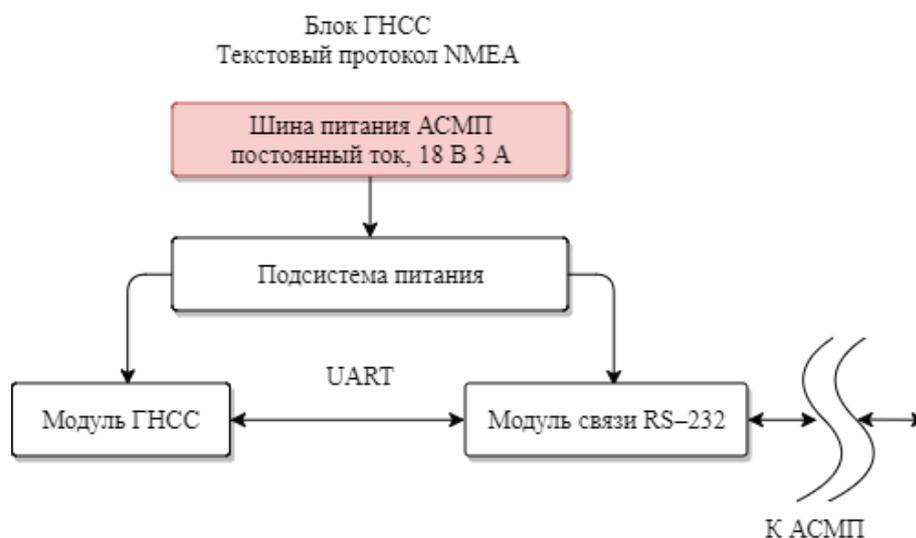


Рисунок 3.4 – Структура блока ГНСС с текстовым протоколом NMEA

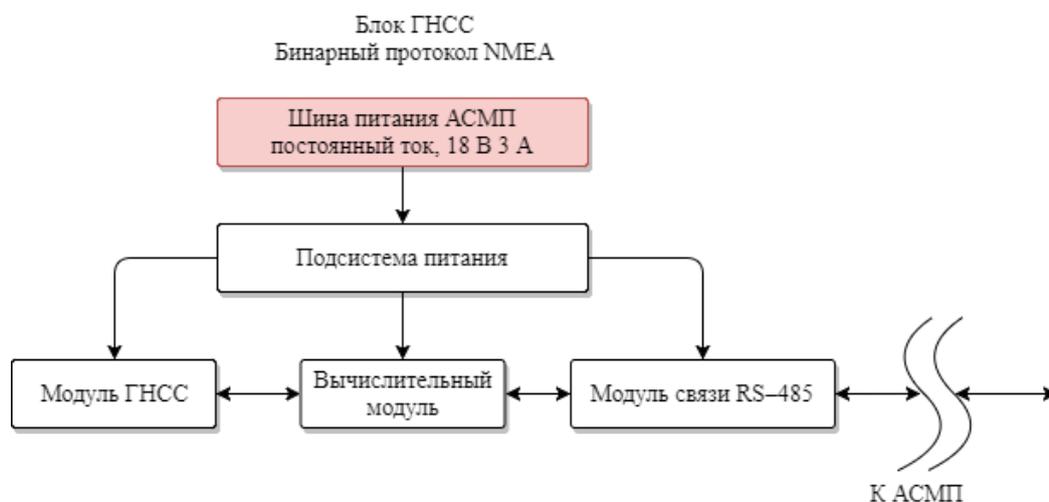


Рисунок 3.5 – Структура блока ГНСС с бинарным протоколом NMEA

*Взаимодействие блоков АСМП* между собой осуществляется по проводным каналам связи стандартов RS-232 и RS-485, получившим широкое распространение в промышленности. Выбор данных стандартов связи обусловлен их хорошей помехоустойчивостью, достаточной дистанцией передачи, скоростью, простотой в реализации и возможностью создания простых изолированных каналов связи. Схема взаимодействия модулей и внешних устройств АСМП приведена на рис. 3.6.

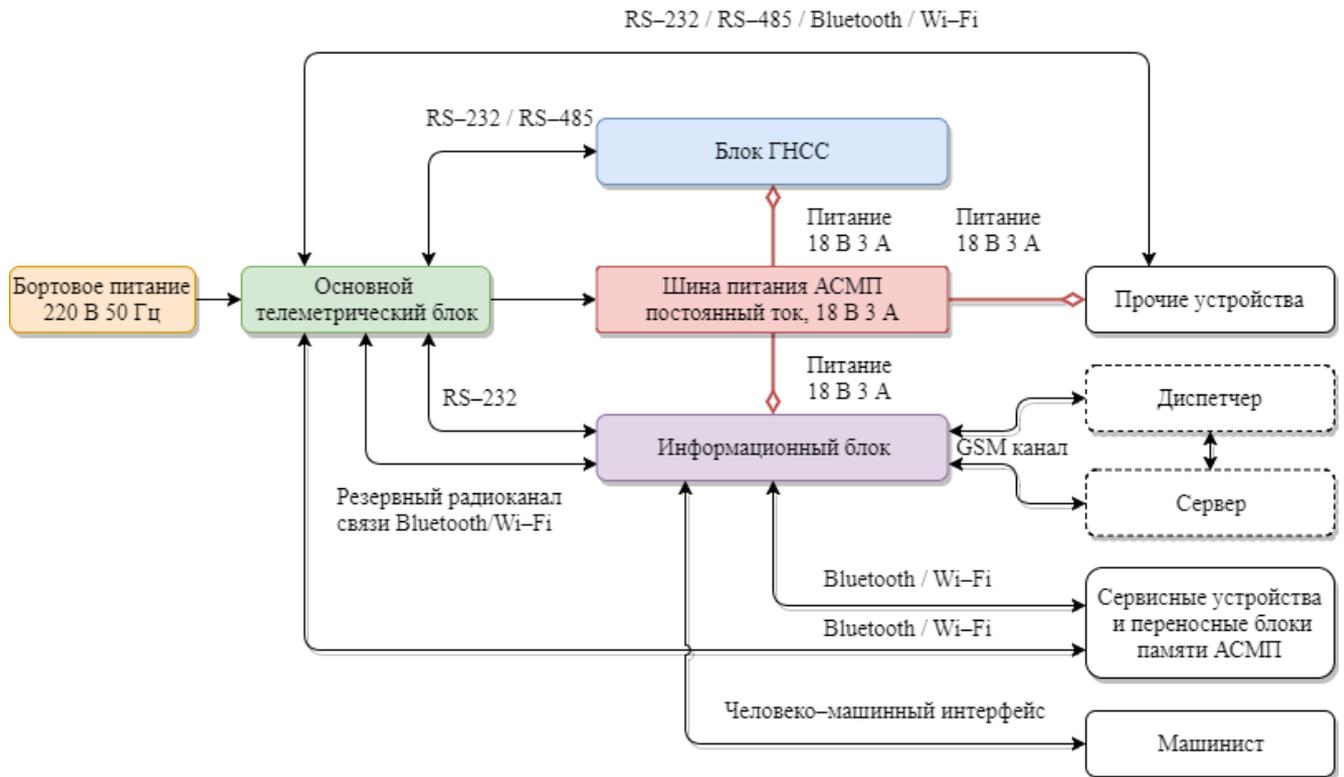


Рисунок 3.6 – Схема взаимодействия модулей и внешних устройств АСМП

Потеря связи между основным телеметрическим блоком затрудняет возможность работы АСМП, поскольку взаимодействие АСМП с машинистом и диспетчером осуществляется через информационный блок. Взаимодействие основного блока с информационным блоком резервируется беспроводным каналом связи для сохранения работоспособности при случайном или целенаправленном нарушении связи между устройствами.

Взаимодействие основного телеметрического блока АСМП с блоком ГНСС осуществляется проводным способом по стандарту RS-232 или RS-485, резервирование линий связи не предусмотрено, поскольку АСМП сохраняет эффективное функционирование и взаимодействие с пользователями при отключении блока ГНСС в течение определенного временного интервала.

Взаимодействие с сервисными устройствами, и устройствами синхронизации осуществляется по закрытому радиоканалу, требующему авторизации подключаемого устройства.

### 3.3 Аппаратное обеспечение АСМП

Аппаратное обеспечение представляет собой физический уровень АСМП, состоящий из элементной базы и схемотехнических решений.

Для повышения надежности и уменьшения массо–габаритных характеристик, стоимости, времени сборки и настройки в АСМП используются интегральные микросхемы (ИМС). Для некоторых модулей разработаны полные функциональные аналоги на основе дискретной элементной базы с целью снижения зависимости от ИМС. Для унификации аппаратного обеспечения, модули АСМП взаимозаменяемы и используются в различных блоках АСМП.

#### *Аппаратное обеспечение основного телеметрического блока*

*Вычислительно–управляющая подсистема* выполняет математические операции, осуществляет управление блоками АСМП и генерацию подсказок для поддержки принятия решений. Подсистема состоит из одного модуля, допускается применение МК или ПЛИС. В данном научном исследовании проверялась работоспособность на основе МК STM32F103C8T6 и ПЛИС Zynq–7010 в составе пользовательской реконфигурируемой ячейки myRIO. В случае необходимости возможно применение МК или ПЛИС других моделей, в том числе отечественного производства. Модуль выполнен в виде полностью автономного устройства, снабженного электронными компонентами, обеспечивающими работу МК или ПЛИС: собственным понижающим источником питания, кварцевым генератором, цепью сброса, дополнительно может оснащаться модулем согласования логического уровня для портов ввода–вывода общего назначения.

*Подсистема первичных преобразователей (датчиков)* предназначена для преобразования физических величин угловой скорости и ускорения в цифровой сигнал посредством МА и МГ, пригодный для обработки вычислительно–управляющей подсистемы. Первичный преобразователь основного

телеметрического блока состоит из модулей на основе прецизионных датчиков МА и МГ – SCA3100/SCA3300 и ADIS 16260/ADIS16265 или одного модуля интегрированного датчика – SCC2230 содержащего в одном корпусе МА и МГ.

Модули представляют собой полностью законченные устройства со всеми необходимыми компонентами для корректной работы и защиты от внешних воздействий, таких как, перенапряжение подсистемы питания.

*Подсистема часов реального времени* предназначена для отсчета системного времени АСМП. Состоит из одного модуля часов реального времени на основе прецизионного высокоточного таймера DS3231. Используются для корректной установки временных меток при отсутствии коррекции времени от ГНСС, погрешность хода высокоточного таймера DS3231 составляет до двух минут в год.

*Подсистема постоянного тока* предназначена для создания общей шины питания для всех устройств АСМП от бортового питания ГТМ, состоит из одного понижающего гальванически развязанного блока питания с выходным напряжением в диапазоне 18...24 В 3 А для компенсации потерь передачи питания к блокам АСМП. Шина питания создается в основном телеметрическом блоке, в качестве блока питания используется модуль TPR 65-124A-J или TOP 100-124 фирмы Traco Power.

*Подсистема питания* предназначена для обеспечения питания устройств АСМП от подсистемы постоянного тока, состоит из нескольких модулей: модуля понижающего напряжения 18...24 – 12 В, модуля зарядки Li-ion аккумулятора, модуля коммутации основного и резервного питания, модуля понижающего двухканального линейного преобразователя 12 В – 5,0 В и 3,3 В.

Ручное переключение питания предусмотрено для управления режимами зарядки, в том числе для тренировки аккумулятора. Для упрощения модули зарядки и коммутации могут конструктивно выполняться одним модулем.

Главным недостатком подобных АСМП является то, что у многих моделей отсутствует система резервирования электропитания и, в случае его отсутствия, система отключаются. Возможна реализация подсистемы резервного питания с

функциями автоматической поочередной тренировки аккумуляторов. Нами реализована подсистема, автоматически коммутирующая основное и резервное питание, осуществляющая зарядку аккумулятора.

*Подсистема связи по радиоканалу* предназначена для связи между блоками АСМП и другими сторонними устройствами, позволяет без прямого физического подключения выполнять настройку АСМП, вносить различные корректировки, считывать данные технологического процесса из БРУ.

Подсистема состоит из одного модуля, стандарт связи Bluetooth или Wi-Fi определяется предприятием.

Унифицированное установочное место позволяет использовать модули, работающие на различных стандартах связи. В АСМП используется модуль Bluetooth связи HC-05 с установленным переходником для доступа к портам ввода-вывода модуля HC-05.

*Подсистема связи RS-232 и RS-485* предназначена для связи между блоками АСМП и другими сторонними устройствами, взаимодействующими с АСМП посредством проводной помехоустойчивой линии связи.

Подсистема связи RS-232 состоит из одного модуля связи по стандарту RS-232 на основе микросхемы MAX3232, подсистема связи по стандарту RS-485 состоит из одного модуля на основе микросхемы ADM2682.

Модуль связи RS-232 обеспечивает последовательный интерфейс приема и передачи данных по линиям RX (прием) и TX (передача) без развязки для организации связи с высокоимпедансной нагрузкой на расстояние до 15 метров со скоростью до 115200 бит/сек. По сигнальному кабелю осуществляется передача постоянного напряжения 18 В для минимизации используемых проводов.

Модуль связи RS-485 обеспечивает полнодуплексный/полудуплексный интерфейс приема и передачи с гальванической развязкой до 5000 В на расстоянии до 1000 м.

*Подсистема согласования логических уровней* предназначена для согласования логических уровней вычислительно-управляющей

подсистемы/вычислительной подсистемы с другими подсистемами и модулями. Состоит из одного модуля на основе ИМС TXB0108PWR.

Модуль является дополнительным, АСМП комплектуется в случае необходимости согласования логических МК или ПЛИС с другими устройствами.

### *Аппаратное обеспечение информационного блока*

Подсистема сотовой связи (GSM) используется для дистанционной передачи технологических данных оператору, для загрузки различных файлов на сервер и передачи команд АСМП. Совместно с программой «загрузчик» она позволяет дистанционно обновлять микропрограммное обеспечение вычислительно–управляющей подсистемы без физического вмешательства.

Для обеспечения двунаправленной голосовой связи между диспетчером и машинистом к модулю подключается микрофон и динамик. При отсутствии мобильной связи происходит буферизация данных в подсистеме памяти.

Нами проверялась работоспособность подсистемы сотовой связи на основе модуля SIM900 фирмы SIMCom и планшета Dexp Ursus 10M.

Подсистема памяти полностью аналогична подсистеме памяти, установленной в основном телеметрическом модуле, предназначена для буферизации данных GSM модуля и записи информации в БРУ.

Подсистема контроля физического воздействия на информационный блок предназначена для фиксации случайного или преднамеренного физического воздействия на АСМП экипажем ГТМ или третьих лиц на основе модуля автомобильных МА и МГ AIS328DQ и A3G4250D или комбинированного МГ и МА – ASM330LНН. Нами используются датчики AIS328DQ и A3G4250D, объединенные в один модуль.

МА работает в режиме детектирования состояний «удар» и «невесомость». Наступление одного из событий означает, что информационный блок подвергается физическому воздействию, например, состояние «невесомость» означает, что модуль находится в состоянии свободного падения. МГ фиксирует

превышение угловой скорости выше порога срабатывания. Движение информационного блока по осям крена и тангажа свидетельствует о том, что информационный блок вращается в нерасчетных плоскостях.

Подсистема аудиовизуального вывода информации предназначена для отображения текущего состояния ГТМ посредством СИД, вывода текстовой информации и звуковых уведомлений машинисту. Состоит из модуля динамика или пьезоизлучателя, модуля текстового дисплея МЭЛТ МТ-20S4A-2FLW, модуля трехцветного светодиода.

Подсистема ввода информации состоит из одного модуля кнопочной клавиатуры.

Подсистема связи RS-232 аналогична подсистеме связи RS-232, установленной в основном телеметрическом блоке.

Подсистема радиочастотной идентификации предназначена для регистрации и авторизации пользователя с предоставлением соответствующего уровня доступа, состоит из одного модуля считывания радиочастотных меток (RFID), не является обязательной, устанавливается в случае необходимости, является электронным ключом авторизации машиниста или администратора для предоставления соответствующего уровня доступа.

### *Аппаратное обеспечение блока ГНСС*

Подсистема ГНСС предназначена для определения пространственных координат ГТМ, коррекции фильтра Маджвика и системного времени.

Состоит из модуля ГНСС и внутренней активной антенны на основе модуля UBLOX NEO-M8N или NEO-M8T.

В данном диссертационном исследовании применялись модули UBLOX NEO-M8N/ NEO-M8T, SIMcom SIM68R, STOTON-702.

Подсистемы питания, информационно-вычислительная и подсистема связи RS-485 аналогична подсистемам, установленным в информационном блоке.

### 3.4 Программное обеспечение АСМП

Программное и алгоритмическое обеспечение АСМП представляет собой набор 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 динамического состояния ГТМ.

Основная задача алгоритма идентификации динамического состояния платформы ГТМ – нахождение и идентификация качественных признаков текущего динамического состояния ГТМ, относительно которых выполняется расчет косвенных признаков, повышающих качество идентификации рабочих технологических состояний ГТМ и контроль за функционированием фильтра Маджвика. Одним из признаков текущего состояния ГТМ является наличие или отсутствие движения платформы ГТМ, регистрируемое рывковым фильтром. В процессе остановки платформы ГТМ возможно уточнить погрешности ИИМ.

При использовании ИИМ в составе АСМП ГТМ можно реализовать эффективный режим коррекции, достигаемый за счет детектирования моментов покоя объекта и анализа последовательности смен динамических состояний платформы ГТМ. Достижение коррекции осуществляется в моменты покоя объекта.

В состав основного алгоритмического обеспечения АСМП входят:

- 1) рывковый фильтр;
- 2) алгоритм идентификации состояния платформы ГТМ на основе рывкового фильтра;
- 3) алгоритм коррекции по нулевой скорости;
- 4) алгоритм автоподстройки коэффициентов усиления фильтра Маджвика;
- 5) имитация магнетометра посредством ГНСС;
- 6) комплексирующий фильтра Маджвика.

### *Рывковый фильтр*

Как отмечалось ранее, при определении ориентации посредством МА возникает неопределенность, связанная с отсутствием информации об ориентации осей акселерометра, особенно, о повороте относительно оси рысканья, поэтому невозможно выполнить декомпозицию ускорения, вызванного функционированием ГТМ от ускорения силы тяжести и рассчитать направление наблюдаемых ускорений. Таким образом, акселерометр непосредственно не позволяет выполнить коррекцию комплексирующего фильтра по оси рысканья.

Предлагаемое решение – анализ изменения значения ускорения акселерометра, которое не зависит от текущей ориентации ИИМ, по направлению изменения ускорения происходит суждение о текущем динамическом состоянии платформы ГТМ, на основе которого выполняется оценка функционирования основного комплексирующего фильтра.

Общая величина изменения ускорения абсолютно независима от ориентации и отражает ускорение, которое связано только с фактом движения или покоя платформы ГТМ. Частичная аппроксимация направления силы тяжести позволяет определить изменение направления движения.

В идеальном случае все измеренные ускорения акселерометра –  $\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z$  зависят от составляющих гравитационного ускорения  $\vec{g}$  и ускорения  $\vec{\psi}$ , зависящего от движения платформы ГТМ:  $\vec{a} = \vec{g} + \vec{\psi}$ . Основа метода рывкового фильтра – измерение скорости изменения ускорения. Особенность метода – получение признаков ускорения, замедления, покоя платформы ГТМ без оценки направления вектора ускорения свободного падения.

Рывковый фильтр определяет вектор разности  $\vec{p}_\Delta = \vec{a}_{n-1} - \vec{a}_n$  двух последовательных ускорений  $\vec{a}_n$  и  $\vec{a}_{n-1}$ , что соответствует динамическому признаку ГТМ на временном интервале  $[t_i, t_{i-1}]$ . Предположим, что ориентация платформы ГТМ не изменилась по осям крена и тангажа на данном временном интервале, получаем, что гравитационная составляющая эквивалентна на этих

двух временных интервалах, т.е.  $\vec{g}_{i-1} = \vec{g}_i$ , тогда вектор разности ускорения  $\vec{p}_\Delta = \vec{\psi}_{n-1} - \vec{\psi}_n$  получается без учета вектора ускорения свободного падения  $\vec{g}$ .

Отличительная особенность рывкового фильтра – оценка угла изменения направления движения. Обозначим угол между векторами ускорений  $\vec{\psi}_n$  и  $\vec{\psi}_{n-1}$  как  $k_i$ . Данный угол не зависит от ориентации платформы ГТМ, точность оценки зависит от точности оценки вектора ускорения свободного падения  $\vec{g}$ . Рывковый фильтр описывается следующей функцией:

$$f(C_i, \kappa_i) = (1 + |\kappa_i|/180)C_i$$

где:

$$C_i = \begin{cases} |\vec{C}_i|, & \text{если } |\vec{a}_i| > |\vec{a}_{i-1}|, \\ -|\vec{C}_i|, & \text{если } |\vec{a}_i| < |\vec{a}_{i-1}|, \\ 0, & \text{если } |\vec{a}_i| = |\vec{a}_{i-1}|. \end{cases}$$

$|\vec{C}_i|$  – модуль вектора платформы ГТМ. Размерность угла  $\kappa_i$  определена в интервале  $[-180^\circ, 180^\circ]$  градусов.

Поскольку оценка углов изменения направления имеет более низкую точность, чем величина рывка, то оценка применяется только для оценки динамического состояния ГТМ.

В случае отсутствия изменения направления вектора,  $f(C_i, \kappa_i)$  является разностью векторов  $C_i$ , чем больше изменяется направление, тем больше коэффициент  $C_i$ . Суждение о текущем динамическом состоянии платформы ГТМ выполняется отслеживанием величины вектора изменения ускорения  $C_i$ . Состояния, рассчитываемые рывковым фильтром:

$S_{\text{би}}$  – без изменений;

$S_{\text{зпч}}$  – замедление против часовой стрелки;

$S_{\text{зч}}$  – замедление по часовой стрелке;

$S_{уч}$  – ускорение по часовой стрелке;

$S_{унч}$  – ускорение против часовой стрелки.

*Программная реализация рывкового фильтра* требует предварительной фильтрации или сглаживания сигнала, поскольку сигналы МА сильно зашумлены.

Из-за ограничений по вычислительным ресурсам, в особенности, по объему оперативной памяти из-за того, что выполняется программа на МК или ПЛИС, для работы рывкового фильтра используется скользящая медиана, которая высчитывает медианные значения ускорений –  $\psi_X^M, \psi_Y^M$  с определенной апертурой  $F_M$ , выбирающейся  $F_M = F_D / 2$ , где  $F_D$  – частота дискретизации. Выбор скользящей медианы обусловлен нормальным законом распределения ускорений акселерометров SCA3100/SCC2230.

Рывковый фильтр содержит подпрограмму определения текущего момента наступления и смены динамического состояния ГТМ. Подпрограмма определения состояния из генеральной совокупности:  $S_{би}, S_{знч}, S_{зч}, S_{уч}, S_{унч}$ , где:  $S_{би}$  – без изменений,  $S_{знч}$  – замедление против часовой стрелки,  $S_{зч}$  – замедление по часовой стрелке,  $S_{уч}$  – ускорение по часовой стрелке,  $S_{унч}$  – ускорение против часовой стрелки. Суждение о текущем изменении ускорения используется программой идентификации динамического состояния платформы ГТМ.

Рывковый фильтр оптимизирован по расходу оперативной памяти для работы на МК или ПЛИС, оптимизация заключается в нахождении медианного значения массивов по мере их формирования, результат медианного фильтра помещается в переменную, массив обнуляется сдвигом указателя в начало массива. Алгоритм работы рывкового фильтра представлен на рис. 3.7.

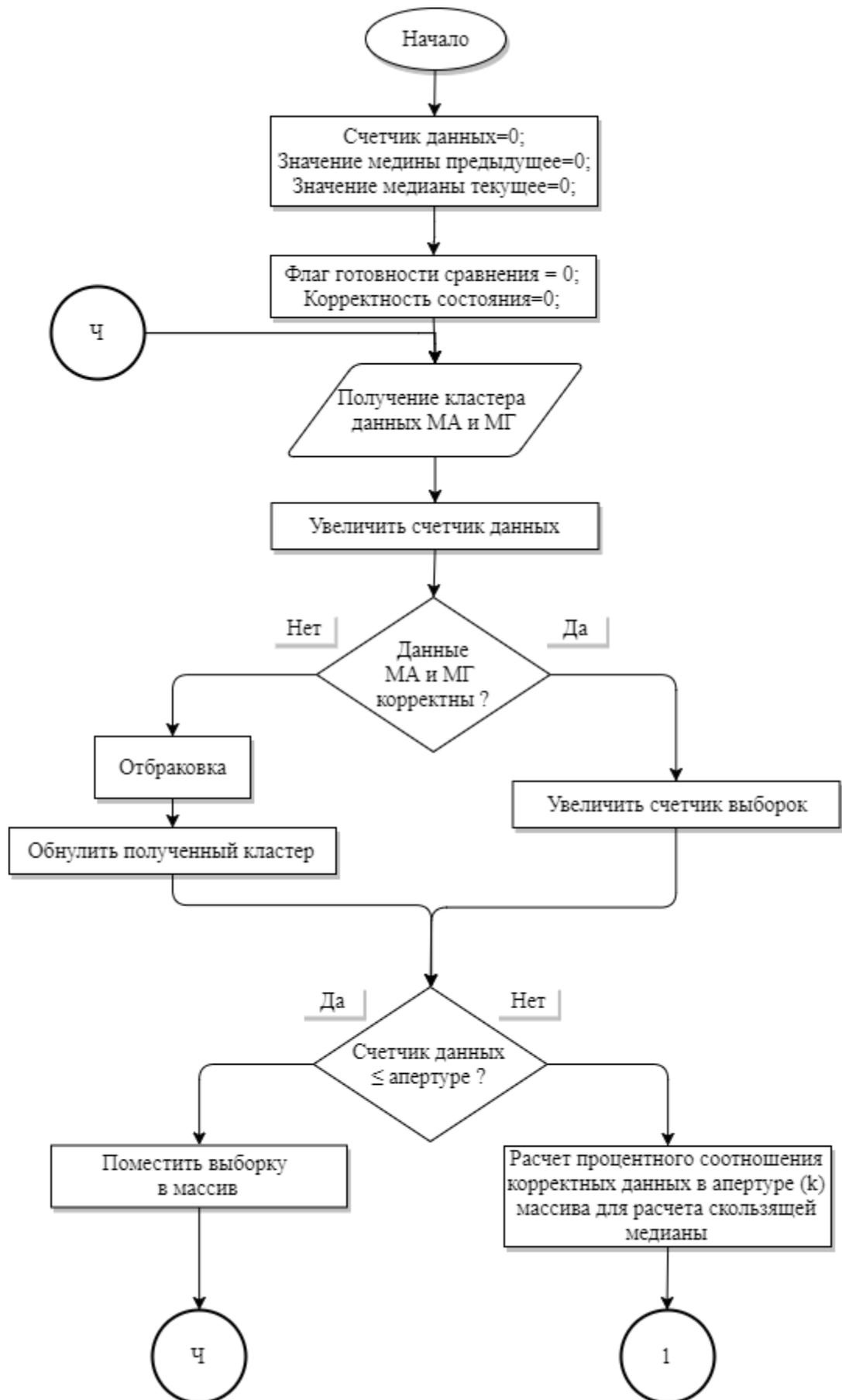


Рисунок 3.7 – Алгоритм рывкового фильтра (начало)

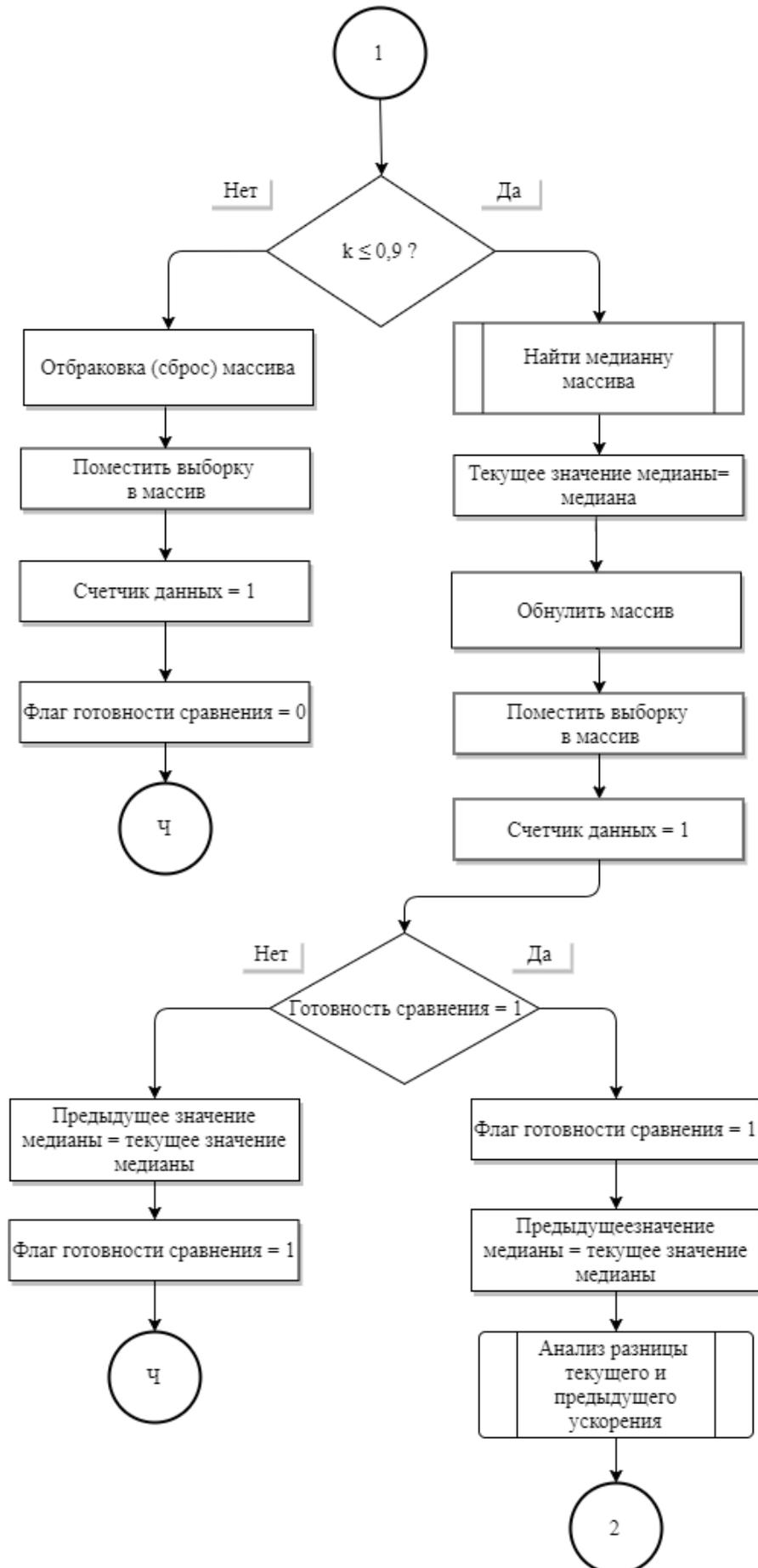


Рисунок 3.7 – Алгоритм рывкового фильтра (продолжение)

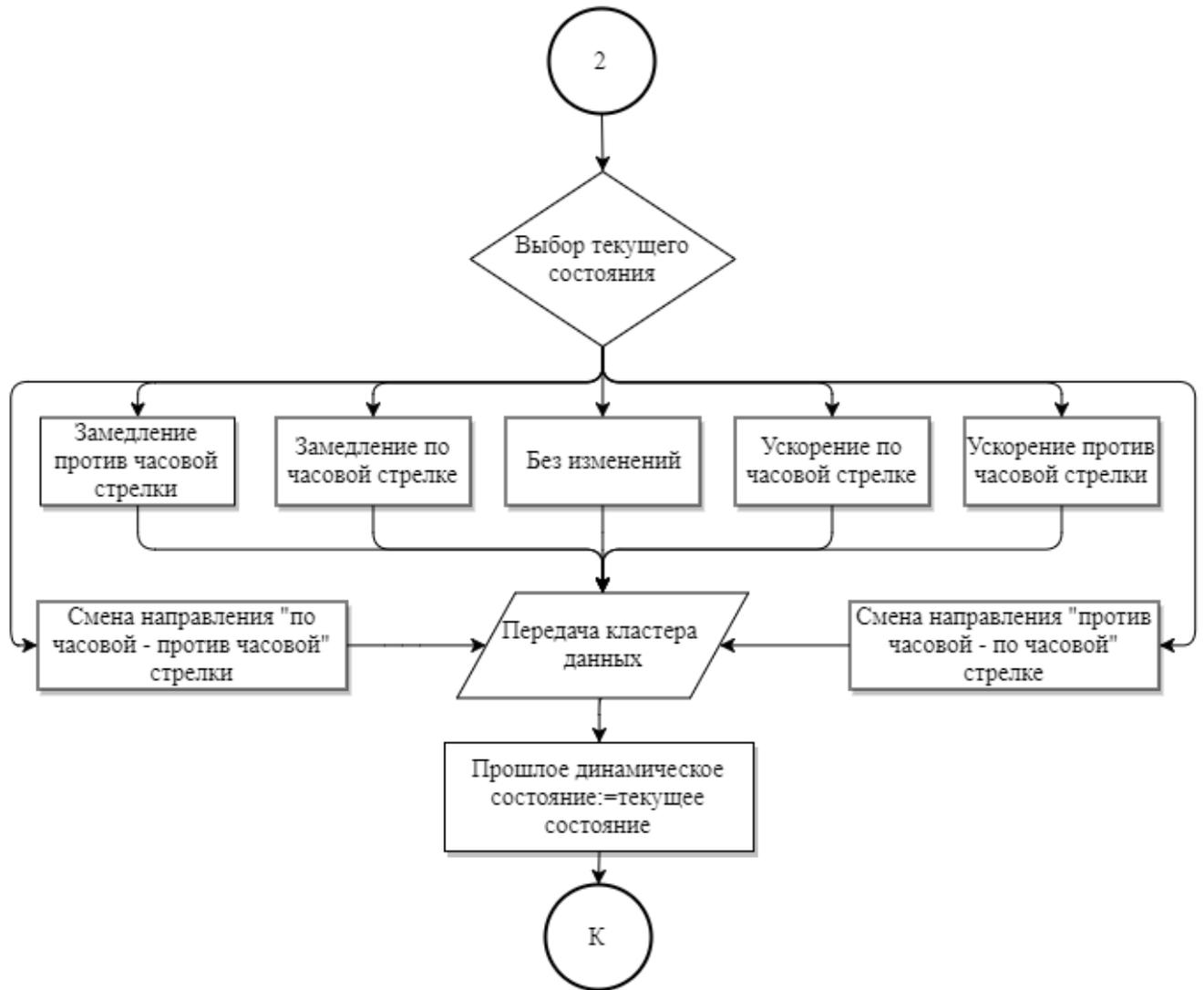


Рисунок 3.7 – Алгоритм рывкового фильтра (окончание)

### *Алгоритм идентификации состояния платформы ГТМ*

Программа идентификации динамического состояния платформы ГТМ предназначена для определения качественных динамических признаков покоя платформы ГТМ на основе результатов работы рывкового фильтра, аддитивным признаком состояния платформы ГТМ является анализ последовательности и длительности смены состояний  $S_{би}$ ,  $S_{зпч}$ ,  $S_{зч}$ ,  $S_{уч}$ ,  $S_{упч}$  рывкового фильтра, который должен соответствовать ориентированному технологическому циклу.

В результате анализа вышеуказанных состояний программа определяет следующие динамические состояния:  $S_n^O$  – покой,  $S_{прп}^O$  – смена направления от

«против часовой стрелки» к «по часовой стрелке»,  $S_{npr}^O$  – смена направления от «по часовой стрелке» к «против часовой стрелки»,  $S_{en}^O$  – вращение по часовой стрелке,  $S_{enn}^O$  – вращение против часовой стрелки.

*Программная реализация идентификации динамического состояния ГТМ* требует наличия аппаратного или программного таймера – счетчика для расчета продолжительности последовательности одинаковых динамических признаков, так же используется сглаживание, поскольку возможно появление кратковременного искажения в последовательности.

Программа генерирует признак динамического состояния ГТМ анализом последовательности смены суждений, граф, описывающий возможные переходы динамических состояний ГТМ, представлен на рис. 3.8.

Признаки динамических состояний платформы ГТМ:

–  $S_n^O$  последовательность переходов

$$((S_{yч} \vee S_{\bar{о}и}) \vee (S_{yнч} \vee S_{\bar{о}и})) \rightarrow (S_{знч} \vee S_{зч}) \rightarrow ((S_{yч} \vee S_{\bar{о}и}) \vee (S_{yнч} \vee S_{\bar{о}и}));$$

–  $S_{npr}^O$  последовательность переходов  $(S_{\bar{о}и} \vee S_{yнч}) \rightarrow (S_{\bar{о}и} \vee S_{знч}) \rightarrow (S_{\bar{о}и} \vee S_{yч})$ ;

–  $S_{npr}^O$  последовательность переходов  $(S_{\bar{о}и} \vee S_{yч}) \rightarrow (S_{\bar{о}и} \vee S_{зч}) \rightarrow (S_{\bar{о}и} \vee S_{yнч})$ ;

–  $S_{en}^O$  последовательность переходов  $S_{\bar{о}и} \rightarrow S_{yч}$ ;

–  $S_{enn}^O$  последовательность переходов  $S_{\bar{о}и} \rightarrow S_{yнч}$ .

Остановка платформы ГТМ



Рисунок 3.8 – Граф возможных переходов динамических состояний ГТМ

На основе функционирования рывкового фильтра происходит суждение о текущем динамическом состоянии ГТМ, которое сопоставляется с показаниями комплексированной угловой скорости.

Идентифицированное динамическое состояние используется в алгоритме коррекции по нулевой скорости комплексированного фильтра.

### *Алгоритм коррекции по нулевой скорости*

Эффективное функционирование комплексированного фильтра ИИМ в составе АСМП достигается за счет коррекции угловой скорости при периодическом обнаружении остановки платформы ГТМ.

Коррекция дрейфа угловой скорости выполняется, исходя из факта остановки платформы ГТМ, так, в неподвижном динамическом состоянии истинное значение угловой скорости тождественно нулю, т.е. выполняется условие  $f(S_n^O)\omega_\delta^k \approx 0$ .

При обнаружении факта динамического покоя платформы ГТМ, производится оценка значения угловой скорости  $-\omega_k$ , во время покоя угловая скорость приравнивается к нулю.

Угловая скорость корректируется оценённым значением  $\omega_k^{op}$ . Результат работы алгоритма коррекции по нулевой скорости представлен на рис. 3.9.

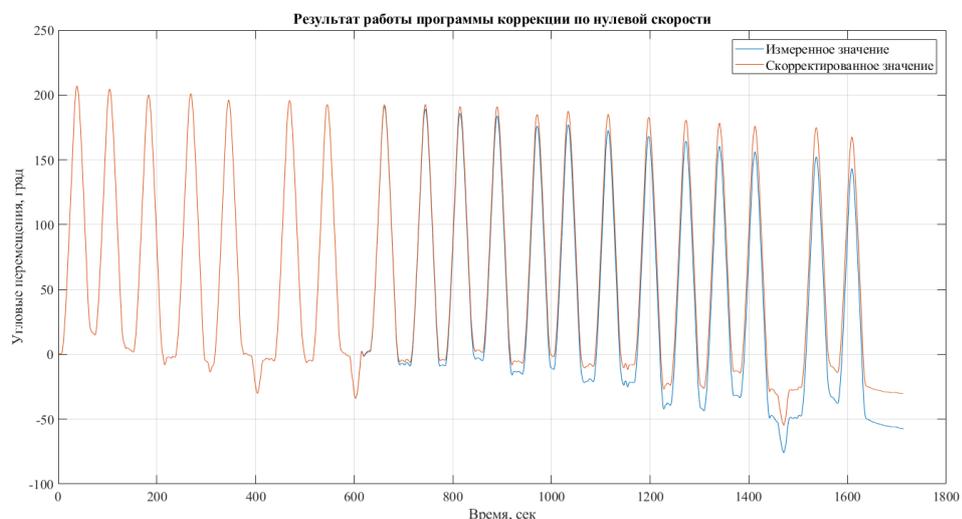


Рисунок 3.9 – Коррекция по нулевой скорости

### ***Алгоритм автоподстройки коэффициентов усиления фильтра Маджвика***

Алгоритм динамической автоподстройки коэффициента усиления фильтра повышает точность ориентации и устойчивость к вибрациям, улучшает сходимость и достоверность фильтра во время работы. Значения дрейфа в детерминированные временные интервалы определяются на этапе калибровки наложенной вариации Аллана.

С течением времени алгоритм динамически подстраивает коэффициенты усиления фильтра на основе массива значений дрейфа МГ, который хранится в калибровочной памяти по формулам (1.1) и (1.2).

### ***Подпрограмма имитации магнетометра посредством ГНСС***

Программа имитации магнетометра посредством ГНСС необходима для выполнения коррекции работы комплексирующего фильтра, коррекция которого осуществляется за счет обнаружения курса ГТМ.

Курс – угол между северным направлением меридиана и направлением продольной оси объекта (линией курса), курс может быть: истинным, магнитным, компасным, в зависимости от меридиана, относительно которого производится расчет [145].

Путевой угол (ПУ) – угол между северным направлением меридиана и направлением движения объекта. Путевой угол может быть магнитным, истинным (географическим), компасным, может быть заданным или фактическим. [146]. Путевой угол представляет собой угол, указывающий на истинный Северный полюс.

Как отмечалось ранее, коррекция фильтра Маджвика зависит от реализации фильтра с магнетометром или без него. В первом случае коррекция выполняется аналогично комплементарному фильтру, во втором случае выполняется дополнительная коррекция по оси рысканья за счет определения направления на магнитный Северный полюс (магнитный путевой угол).

Поскольку ГТМ (драглайны и мехлопаты) являются электрическими машинами, функционирование магнетометра (электронного компаса) крайне затруднительно из-за возникающих магнитных дисторсий, исходящих от металлических частей конструкции и силовых агрегатов. Функционирование ИИМ АСМП в комплектации с магнетометром на гидравлических ГТМ показало возможность применения фильтра Маджвика в реализации с магнетометром, достаточно рассчитать поправку в зависимости от места установки магнетометра и выполнять периодическую калибровку.

Предлагаемое решение: имитация работы магнетометра для фильтра Маджвика посредством определения истинного путевого угла при помощи ГНСС. Определение путевого угла позволит имитировать показания магнетометра, тем самым, сделает возможным коррекцию фильтра Маджвика и позволит вести альманах угловых перемещений ГТМ относительно путевого угла.

Данное решение возможно осуществить двумя способами:

1) использование одного приёмника ГНСС, установленного на максимально возможном удалении от центра вращения ГТМ –  $L_{GNSS}$  с последующим накоплением массива координат  $Q$ . В данном научном исследовании использовался первый путь решения, установка приемника ГНСС располагалась на расстоянии 9,9 метра от геометрического центра вращения ГТМ. При расчетах  $L_{GNSS}$  условно принята равными 10 м.;

2) использование двух модулей ГНСС для работы в дифференциальном режиме, при котором один приемник ГНСС устанавливается непосредственно в центре вращения ГТМ и служит опорной станцией, второй приемник устанавливается на максимально возможном удалении от центра вращения ГТМ –  $L_{DGNSS}$ . Применение двух приемников ГНСС формирует две точки, по которым определяется прямая, указывающая угол азимута.

Схема предлагаемой установки приемников ГНСС для первого способа представлена на рис. 3.10., для второго способа представлена на рис. 3.11.

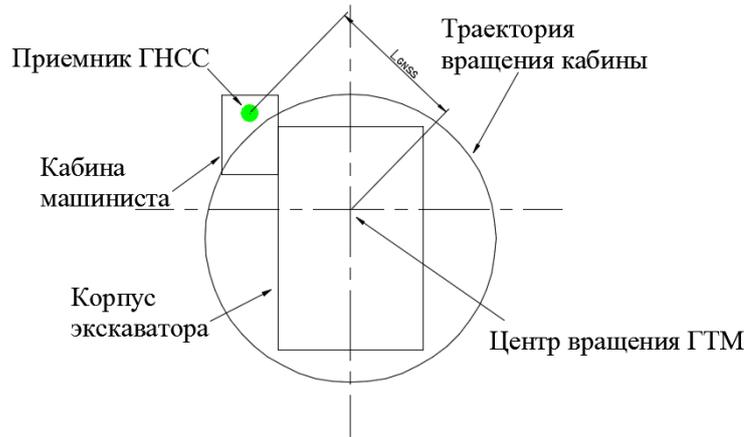


Рисунок 3.10 – Имитация магнетометра посредством накопления массива координат движения кабины

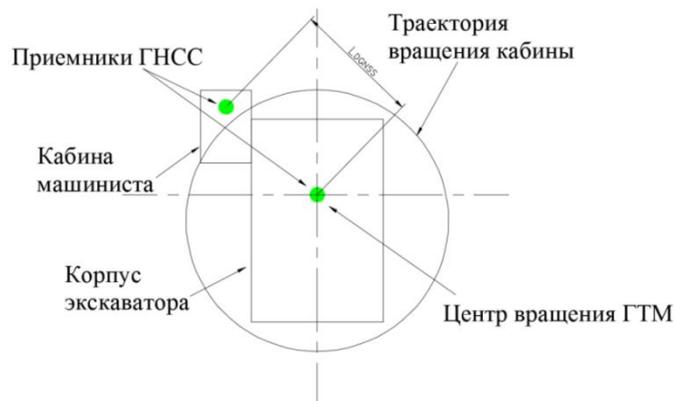


Рисунок 3.11 – Имитация магнетометра посредством определения линии, заданной двумя точками – приемниками ГНСС

Для ГТМ циклического действия характерно угловое изменение координат, описывающих дугу или окружность с радиусом –  $R_{ГТМ}$ , его можно представить как расстояние от центра вращения –  $C_{ГТМ}$  до точки установки приемника ГНСС, т.е.  $R_{ГТМ} = L_{GNSS}$  или в дифференциальном режиме  $R_{ГТМ} = L_{DGNS}$ .

При геодезических и навигационных вычислениях используются различные модели Земли, в нашем исследовании используется сферическая модель с усреднённым радиусом  $R_3 = 6372795$  м, выбор данной модели обусловлен снижением вычислительной нагрузки на вычислительно–управляющую подсистему посредством использования табличных значений тригонометрических функций в памяти МК, при данной модели погрешность вычисления расстояния составит порядка  $\Delta \approx 0,5\%$ .

Вычисление расстояния и азимутов может выполняться тремя различными способами [147, 148]:

- 1) аналитическим способом по сферической теореме косинусов;
- 2) хордовым способом;
- 3) векторным способом.

Нами выбран аналитический способ, поскольку он обладает более высокой точностью вычисления, чем вычисление спроектированных координат, они не требуют проведения проекционных преобразований.

Вычисление расстояния между известными координатами –  $Q$  представляет собой обратную геодезическую задачу, решение которой осуществляется по формуле гаверсинусов, которая описывается следующим выражением:

$$\Delta\delta = 2 \times \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{2} \right) + \cos \Theta_1 \cos \Theta_2 \sin^2 \left( \frac{\Delta\Xi}{2} \right)} \right),$$

где:  $\Theta$  – координаты широты;  $\Xi$  – координаты долготы;  $\Delta\Xi$  – разница между координатами долготы  $\Xi_2 - \Xi_1$ .

Метод гаверсинусов подвержен влиянию критических точек «антиподов», (точек, противоположных друг другу на сфере, между которыми возможно провести бесконечное количество больших кругов).

Для устранения проблемы точек–антиподов используется модификация формулы гаверсинусов, которая представлена выражением:

$$\Delta\delta_{q_1q_2} = \arctan \left( \frac{\sqrt{[\cos \Theta_2 \sin \Delta\Xi]^2 [\cos \Theta_1 \sin \Theta_2 - \sin \Theta_1 \cos \Theta_2 \cos \Delta\Xi]^2}}{\sin \Theta_1 \sin \Theta_2 + \cos \Theta_1 \cos \Theta_2 \cos \Delta\Xi} \right).$$

Угол азимута определяется следующим выражением:

$$\theta_{\text{deg}}^{\text{ГНС}} = \text{atan2}(\cos(\text{lat}_1) \times \sin(\text{lat}_2)) - (\sin(\text{lat}_1) \times \cos(\text{lat}_2) \times \cos(\text{long}_2 - \text{long}_1)) \times \dots \\ \dots \times \sin(\text{long}_2 - \text{long}_1) \times \cos(\text{lat}_2)$$

где:  $\theta_{\text{deg}}^{\text{ГНС}}$  определен в интервале  $[0^\circ, 360^\circ]$  град;  $\text{lat}_1$  – широта первой координаты;  $\text{lat}_2$  – широта второй координаты;  $\text{long}_1$  – долгота первой координаты;  $\text{long}_2$  – долгота второй координаты.

Поскольку угол азимута отсчитывается от значения  $\pi/2$  числовой окружности по направлению часовой стрелки, то для корректного отображения координат требуется поворот значений долготы, которое выполняется поворотом вокруг оси  $X$  на  $-90^\circ$  град. Поворот вокруг оси описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned}x' &= x, \\y' &= y \cos \theta + z \sin \theta, \\z' &= -y \sin \theta + z \cos \theta.\end{aligned}$$

Результатом решения обратной геодезической задачи являются расстояние ( $\Delta\delta_{q_1q_2}$ ) и азимут ( $\theta_{\text{deg}}^{\text{ГНСС}}$ ) между двумя точками –  $Q_1$  и  $Q_2$ . Циклическое решение прямой геодезической задачи формирует последовательность точек  $Q_n$  в локальной декартовой системе координат.

Поскольку рабочее перемещение платформы ГТМ осуществляется в двумерной плоскости, можно исключить третью компоненту – высоту, тем самым, используя геометрию на плоскости. Применение метода трилатерации или линейной пространственной засечки, а также аналогичными способами не целесообразно в виду используемой двумерной системы.

Траектория движения ГТМ во время выполнения ТПЭ, образованная последовательностью точек  $Q_i$  удаленных на  $R_{\text{ГТМ}}$ , представлена на рис. 3.12.

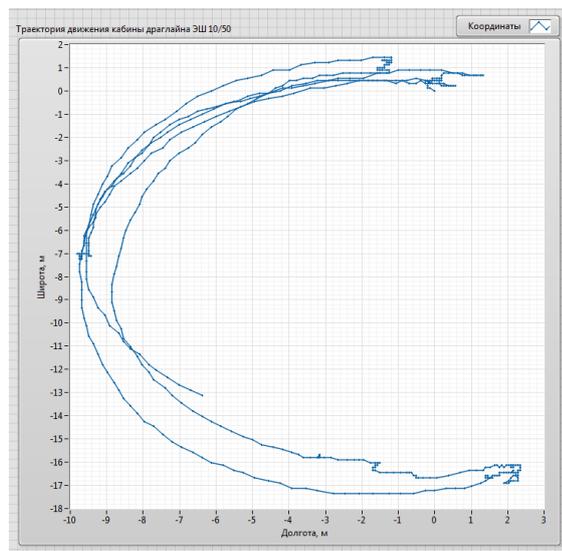


Рисунок 3.12 – Траектория движения ГТМ образованная последовательностью точек (после фильтрации)

Для нахождения угла азимута необходимо построить прямую по двум точкам, одна из которых является центром вращения ГТМ, поэтому для функционирования алгоритма коррекции необходимо определить координаты центра вращения ГТМ в случае использования одного модуля ГНСС.

### *Алгоритм определения координат центра вращения ГТМ*

Реализации алгоритма коррекции с одним приемником ГНСС – нахождение центра вращения ГТМ осложнена нахождением координаты геометрического центра ГТМ. Один из возможных методов – нахождение центра вращения ГТМ, измерение убыли и приращения составляющих координат – широты  $Q_{\Theta}$  и долготы  $Q_{\Xi}$  точек  $Q$  за определенный временной интервал  $t_{ГНСС}^y$ :

$$f(\Delta Q_{\Theta} \wedge \Delta Q_{\Xi}) \in \Delta \Theta \wedge \Delta \Xi \quad .$$

Учитывая радиус траектории и скорость движения приемника ГНСС, можно считать, что происходит последовательное изменение  $Q_{\Theta}$  и  $Q_{\Xi}$ , принадлежащим к различным географическим сторонам света, например, вращение платформы ГТМ приведет к последовательной смене координат Север–Восток–Юг, которое будет характеризоваться уменьшением и приращением составляющих  $Q_{\Theta}$  и  $Q_{\Xi}$ . Учитывая стороны света и их промежуточные состояния, возможно 16 изменений координат. Изменение  $Q_{\Theta}$  и  $Q_{\Xi}$  во время ТПЭ ГТМ можно охарактеризовать графом, представленным на рис. 3.13.

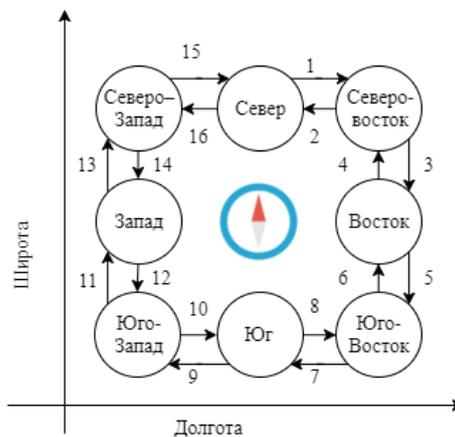


Рисунок 3.13 – Граф возможных изменений координат

В табл. 3.1 приведены все возможные варианты переходов графа, изображенного на рис. 3.13, при изменении координат  $Q_{\ominus}$  и  $Q_{\Xi}$ .

Таблица 3.1 – Возможные изменения координат графа

№ пере хода	Изменение		№ пере хода	Изменение	
	$Q_{\ominus}$	$Q_{\Xi}$		$Q_{\ominus}$	$Q_{\Xi}$
1	Уменьшение	Увеличение	9	Увеличение	Уменьшение
2	Увеличение	Уменьшение	10	Уменьшение	Увеличение
3	Уменьшение	Увеличение	11	Увеличение	Уменьшение
4	Увеличение	Уменьшение	12	Уменьшение	Увеличение
5	Уменьшение	Уменьшение	13	Увеличение	Увеличение
6	Увеличение	Увеличение	14	Уменьшение	Уменьшение
7	Уменьшение	Уменьшение	15	Увеличение	Увеличение
8	Увеличение	Увеличение	16	Уменьшение	Уменьшение

Как видим, изменение координат внутри одного квадранта дублируются, что вызывает неопределенность переходных состояний в обоих направлениях: Северо – Восток, Юго – Восток, Юго – Запад, Северо – Запад.

Учитывая неопределенность переходных состояний, можно сократить граф, представленный на рис. 3.13, исключив переходные состояния. С учетом сокращения состояний граф, представленный на рис. 3.13, принимает вид, представленный на рис. 3.14.

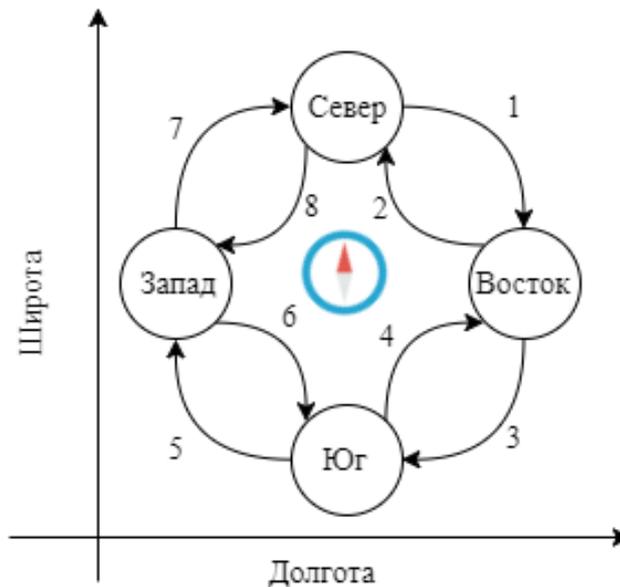


Рисунок 3.14 – Сокращенный граф возможных изменений координат

В табл. 3.2 приведены все возможные варианты переходов сокращенного графа, представленного на рис. 3.14 при изменении координат  $Q_{\ominus}$  и  $Q_{\Xi}$ .

Таблица 3.2 – Возможные изменения координат сокращенного графа

№ пере хода	Изменение	
	$Q_{\ominus}$	$Q_{\Xi}$
1	Уменьшение	Увеличение
2	Увеличение	Уменьшение
3	Уменьшение	Уменьшение
4	Увеличение	Увеличение
5	Увеличение	Уменьшение
6	Уменьшение	Увеличение
7	Увеличение	Увеличение
8	Уменьшение	Уменьшение

Таким образом, изменение  $Q_{\ominus}$  и  $Q_{\Xi}$  идентифицирует принадлежность  $Q$  к определённом географическому квадранту. Факт последовательного перехода в другой квадрант свидетельствует о нахождении приемника ГНСС вдоль меридиана или параллели. Достаточно найти противоположную точку, которая опишет линию, посреди которой и находится искомый центр вращения. В табл. 3.3 представлены углы нахождения противоположной точки для нахождения координаты геометрического центра вращения ГТМ. Геометрическое представление углов для нахождения противоположной точки представлено на рис. 3.15.

Таблица 3.3 – Углы для нахождения противоположной точки

Переход	Противоположная сторона света	Азимут
Восток–Запад (Север)	Юг	180
Юг–Север (Запад)	Восток	270
Восток–Запад (Юг)	Запад	0
Север–Юг (Восток)	Юг	90

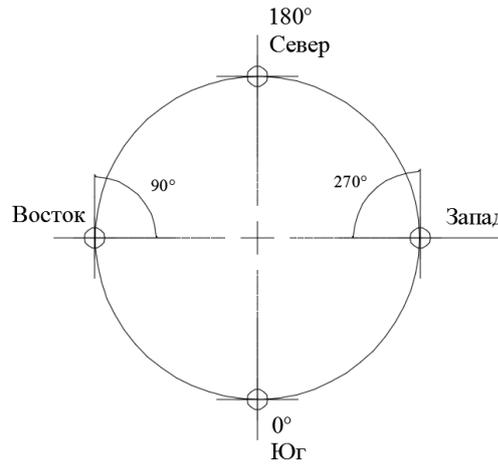


Рисунок 3.15 – Геометрическое построение углов для нахождения противоположащей точки

Искомая составляющая широты точки геометрического центра вращения платформы ГТМ определяется решением прямой геодезической задачи с расстоянием  $L_{GNSS}/2$  или по следующему выражению, определяющему среднюю координату:

$$\Theta_m^{GTM} = \arctan 2(\sin \Theta_1 + \sin \Theta_2, \sqrt{(\cos \Theta_1 + \cos \Theta_2 \cos(\Delta \Xi))^2 + (\cos \Theta_2 \sin(\Delta \Xi))^2}) \quad .$$

Искомая составляющая долготы точки геометрического центра вращения платформы ГТМ определяется следующим выражением:

$$\Xi_m^{GTM} = \Xi_1 + \arctan(\cos \Theta_2 \sin \Delta \Xi, \cos \Theta_1 + \cos \Theta_2 \cos \Delta \Xi) \quad .$$

Полученные координаты точек сильно зашумлены и подвержены сильному дрейфу из-за влияния тропосферы и ионосферы, поэтому требуется предварительная фильтрация и сглаживание полученных точек.

Сглаживание выполняется адаптивным алгоритмом обработки потока навигационных данных на основе метода диагностической фильтрации, представленного в статье [149].

Применение станции дифференциальных поправок и специализированных приемников ГНСС, учитывающих дифференциальные поправки, значительно повышают точность определения координат, вплоть до 0,1 метра.

### *Дифференциальный режим работы ГНСС*

Применение приемника ГНСС, установленного в центре ГТМ, существенно упрощает задачу, поскольку не требуется определять координаты центра вращения ГТМ, вычисление путевого угла выполняется непосредственным решением обратной пространственной задачи. Помимо значительного упрощения определения путевого угла, дифференциальный режим позволяет значительно повысить точность определения, благодаря одинаковому влиянию искажений сигнала ГНСС, создаваемых ионосферой и тропосферой на рядом расположенные приемники.

Применение двух приемников ГНСС позволяет реализовать высокоточный фазовый метод определения координаты относительно базовой станции RTK (англ. Real Time Kinematics – кинематика реального времени) или DGPS (англ. Differential Global Positioning System – дифференциальная коррекция). Реализация режима RTK или DGPS потребует дополнительного высокопроизводительного счетно–решающего устройства на основе одноплатного компьютера и операционной системы, функционирующей в реальном времени, а также специализированных библиотек RTKLIB.

### *Имитация магнетометра*

Трехосевой магнетометр определяет характеристики магнитного поля Земли. Направления магнитных полей Земли нормальны друг к другу, т.е. фазы измеряемых характеристик магнитного поля Земли будет отличаться на  $\pi/2$  град. Определение азимута магнетометром выполняется по формуле:

$$\theta_{\text{deg}}^M = \arctan(X, Y) \quad ,$$

где:  $X$  – северная составляющая магнитного поля Земли;  $Y$  – южная составляющая магнитного поля Земли;

Решение обратной задачи выполняет преобразование  $\theta_{deg}^{GHCC}$  в составляющие магнитного поля Земли. Поскольку  $\theta_{deg}^M$  определен в интервале  $[0^\circ, 180^\circ]$  к Западному направлению и  $[0^\circ, -180^\circ]$  к Восточному направлению, а  $\theta_{deg}^{GHCC}$  определен в интервале  $[0^\circ, 360^\circ]$ , требуются преобразование удовлетворяющее следующему условию:

$$\theta_{deg}^M = \begin{cases} \theta_{deg}^{GHCC}, & \text{если } 0^\circ \leq \theta_{deg}^{GHCC} < 90^\circ \\ 180 - \theta_{deg}^{GHCC}, & \text{если } 90^\circ \leq \theta_{deg}^{GHCC} < 180^\circ \\ \theta_{deg}^{GHCC} - 180, & \text{если } 180^\circ \leq \theta_{deg}^{GHCC} < 270^\circ \\ 360^\circ - \theta_{deg}^{GHCC}, & \text{если } 270^\circ \leq \theta_{deg}^{GHCC} < 360^\circ \end{cases} .$$

В результате преобразования получается, что  $\theta_{deg}^M$  находится в интервале  $[180^\circ, -180^\circ]$  градусов. Преобразование  $\theta_{deg}^M$  к составляющим магнитного поля Земли осуществляется следующим выражением:

$$X = \cos(\theta_{deg}^M), \quad Y = \sin(\theta_{deg}^M) \quad ,$$

Таким образом, на основе преобразования значения угла азимута, полученного посредством ГНСС, в характеристики магнитного поля, выполняется коррекция фильтра Маджвика.

### ***Выводы по программе имитации магнетометра***

Решение с применением одного приемника ГНСС чувствительно к используемому оборудованию ГНСС. Качество функционирования алгоритма коррекции зависит от математического обеспечения чипсета приемника ГНСС и используемой антенны. Тестирование различных модулей ГНСС выявило значительные различия в точности определяемых координат. Например, модули UBLOX NEO-M8N имеют встроенный фильтр Калмана, который обеспечивает точность CEP (*англ.* circular error probable – вероятная круговая ошибка), равную 2,0 м, модули GN-801 фирмы STOTON имеют точность CEP, равную 2,5м, высокоточные модули UBLOX NEO-M8T достигают точности CEP до 1,5 м без

внешней коррекции с дифференциальной коррекцией или сервером, передающим поправки через интернет, точность СЕР увеличивается вплоть до 0,1 м.

Для второго способа требуется использование двух приемников ГНСС, работающих в дифференциальном режиме. Дифференциальный режим значительно повышает точность определения азимута и увеличивает точность угловой ориентации по оси рысканья, но требует применения высокопроизводительного счетно–решающего устройства и адаптации библиотек RTKLIB для программного обеспечения.

### 3.5 Выводы по третьей главе

При разработке АСМП, мы получили следующие результаты:

1. Разработана структура АСМП на основе системы сбора и обработки данных, схемы элементов и модулей, взаимодействие элементов системы между собой в соответствии с требованиями заказчика.

2. Разработано аппаратное обеспечение АСМП, к которому относятся:

- модуль прецизионного МГ ADIS16265, МА SCA3100;
- модуль интегрированного датчика МА и МГ SCC–2230;
- модуль часов реального времени DS3231;
- модуль беспроводной связи HC–05;
- объединенный модуль зарядки и коммутации основного резервного питания на основе LTC4412 и LT3650–8.2;
- модуль понижающего двухканального линейного преобразователя LM317 (KP142EH12A);
- модули связи стандарта RS–232, RS–485;
- модуль согласования уровней TXB0108PWR;
- модуль контроля физического воздействия на информационный блок на основе МА AIS328DQ и МГ A3G4250D.

3. Разработана автоматизированная система сбора и обработки данных для компьютерного моделирования комплексующих фильтров, являющейся основой АСМП, выполнена на основе интегрированной среды разработки – LabView 2017, контроллера myRIO и изготовленных электронных модулей. Выполнена отработка аппаратного, программного обеспечения АСМП, сбор данных МА, МГ и ГНСС в лабораторных и производственных условиях.

4. Разработано и протестировано программное и алгоритмическое обеспечение АСМП на основе системы сбора и обработки данных. Разработаны алгоритмы повышения качества функционирования комплексующего фильтра Маджвика: алгоритм рывкового фильтра; алгоритм идентификации динамического состояния платформы ГТМ; алгоритм коррекции по нулевой скорости; алгоритм автоподстройки коэффициентов усиления; алгоритм коррекции комплексующего фильтра Маджвика посредством ГНСС.

## 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ АСМП ГТМ

### 4.1 Оценка характеристик работы АСМП экскаватора серии ЭШ

Предварительная настройка и калибровка аппаратного – программного обеспечения МГ и МА является необходимым условием для функционирования АСМП. Оценка эффективности работы и точности позиционирования АСМП ГТМ выполнялась визуально–аналитическим способом.

Для обеспечения режимов координации нескольких ГТМ, бортового контроля, ориентации стрелы ГТМ, необходимо обеспечить устойчивое функционирование АСМП и точность угловой ориентации платформы ГТМ по оси рысканья.

#### *Точность угловой ориентации по оси рысканья*

Точность угловой ориентации по оси рысканья определялась по четырем реперным меткам, расположенным с равным шагом в пять градусов от триангуляционной точки. Триангуляционная точка и реперные метки были установлены геодезической службой. Схема установки опорных меток для определения угловой ориентации по оси рысканья изображена на рис. 4.1.

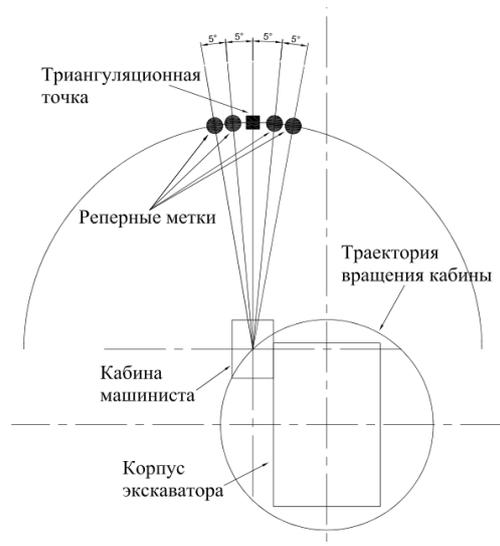


Рисунок 4.1 – Определение точности угловой ориентации по оси рысканья

В качестве нулевой опорной метки выбрана триангуляционная точка, относительно которой осуществлялись измерения отклонения угловой ориентации и первоначальное базирование кабины ГТМ. Через определенные временные интервалы определялось местонахождение кабины ГТМ относительно триангуляционной точки, рассчитывалась погрешность угловой ориентации по графическому интерфейсу программы.

Абсолютная погрешность угловой ориентации по истечению 60 минут работы АСМП с функционирующим алгоритмом коррекции посредством ГНСС составила не больше  $5^\circ$  для гироскопа ADIS16265 и не больше  $9^\circ$  для гироскопа SCC2230, относительно триангуляционной точки.

### ***Точность идентификации рабочих циклов***

Точность идентификации рабочих циклов обеспечивалась подпрограммой идентификации технологических состояний и алгоритмом коррекции посредством ГНСС. Точность идентификации рабочих циклов оценивалась визуально. Представители комиссии находились в кабине машиниста, из которой наблюдали ТПЭ. Машинист вел бортовой журнал, в котором отмечал количество выполненных технологических операций черпания, и другую дополнительную технологическую информацию (количество составов думпкаров, выгрузивших горную массу в отвал и т.п.).

Одновременно осуществлялась видеорегистрация и стенографическая запись рабочих циклов ТПЭ, на основании которых была составлена циклограмма работы шагающего экскаватора, которая автоматически в режиме реального времени идентифицировала рабочие циклы, выводила информацию на экран компьютера, выполняла запись параметров ТПЭ в БРУ.

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, зафиксированными наблюдателями, с циклограммой, сгенерированной АСМП.

Относительно показаний наблюдателей рассчитывалось среднеквадратичное отклонение циклограммы суммарного/общего количества зафиксированных технологических состояний АСМП:  $C_{xx}^D; C_{ч}^D; C_{тч}^D; C_p^D; C_{тр}^D; C_{всп}^D; C_{шаг}^D; C_{пер}^D$ . На экране компьютера в графическом интерфейсе в конце испытания была выведена статистическая информация о ходе выполнения ТПЭ.

На рис. 4.2. представлен графический интерфейс программы для анализа эффективности работы драглайна ЭШ10/50, отображающий следующие характеристики ТПЭ: суммарную и среднюю продолжительность, процентное соотношение и количество рабочих циклов, технологические события, испытания, время начала, конца и продолжительность испытания.

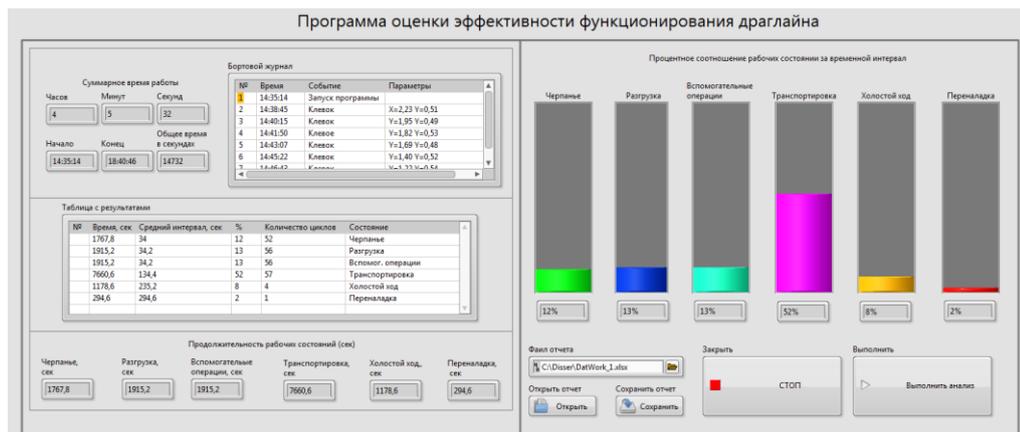


Рисунок 4.2 – Интерфейс программы анализа эффективности работы драглайна ЭШ10/50

Для достижения высокой точности идентификации технологических состояний и оценки эффективности работы ГТМ необходимо выполнить калибровку МА и МГ, настройку алгоритмов ЦОС. Для тестирования алгоритмов ЦОС и алгоритмов работы АСМП был спроектирован и изготовлен испытательный стенд двухосевой системы стабилизации, предназначенный для калибровки МА, апробации алгоритмов управления, проектирования новых электронных устройств, программирования МК и имитации возмущающего воздействия.

***Предварительная калибровка МА и МГ, определение поправок начального базирования модулей датчиков АСМП***

Предварительная калибровка МА и МГ должна выполняться на специализированном стенде, для МА это двухосевой наклонный стенд, для МГ это поворотная платформа.

Для проведения калибровки МА был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд двухосевой системы стабилизации, позволяющий задавать угол наклона  $\pm 15^\circ$  по осям крена и тангажа с шагом  $0,1^\circ$  градусов.

Сформирована отрицательная обратная связь посредством аналогового двухосевого промышленного инклинометра SCA121T-D07 для точного определения угла наклона платформы.

Для точного позиционирования наклонной плоскости стенда с точностью не менее  $0,1^\circ$  в условиях сильной зашумленности сигнала необходима тщательная предварительная калибровка АЦП СУ стенда и настройка фильтра для ЦОС СУ.

Погрешность МЭМС-датчиков можно представить совокупностью случайной и систематической погрешности. Систематическая погрешность МГ и МА является уникальной для каждого датчика (нет общей модели для датчиков данного типа) и может значительно отличаться внутри одной партии изготовленных датчиков, поэтому необходимо выполнять калибровку каждого датчика МА и МГ для нивелирования влияния систематической погрешности и корректного функционирования АСМП.

Линейные размеры стенда:  $L_{DE} - 137$  мм;  $L_{EF} - 95$  мм;  $L_{CH} - 10$  мм;  $L_{GH} - 140$  мм;  $L_{AF} - 55$  мм;  $L_{GF} - 193,3$  мм;  $L_{DG} - 28$  мм;  $L_0 - 125,495$  ;  $L_1 - 45$  мм;  $L_2 - 100$ ;  $L_3 - 140$  мм.

Геометрическая расчетная схема стенда представлена на рис. 4.3.

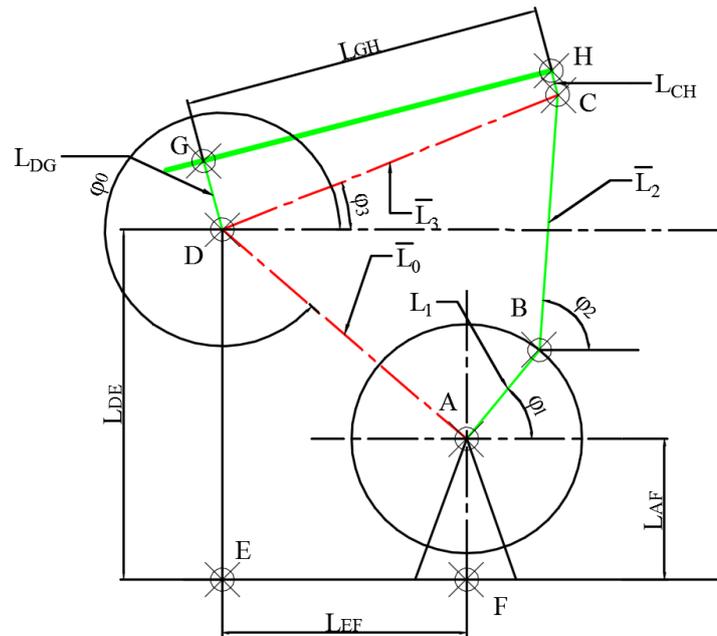


Рисунок 4.3 – Геометрическая расчетная схема испытательного стенда

Стенд представляет собой две пластины, соединённые между собой карданным валом (точка  $D$ ). Наклон верхней пластины ( $GH$ ) осуществляется сервоприводами, к кривошипам которых ( $AB$ ) присоединены шатуны ( $\bar{L}_2$ ). Последние шарнирно связаны с выступами ( $L_{CH}$ ) верхней пластины. На нижнюю неподвижную пластину устанавливаются все элементы стенда.

Геометрическая зависимость наклона плоскости  $GH$  (угол  $\varphi_3$ ) от угла поворота кривошипа сервопривода  $\varphi_1$  описывается формулой:

$$\varphi_3 = \arcsin \frac{\frac{AC}{B^2} \pm \sqrt{\frac{A^2 C^2}{B^4} - \left(\frac{C^2}{B^2} + 1\right) \left(\frac{A^2}{B^2} - 1\right)}}{\frac{C^2}{B^2} + 1} - \arctan \frac{L_{GD} - L_{CH}}{L_{GH}}, \quad (4.1)$$

где:

$$\varphi_0 = 2\pi - \arctan \frac{L_{DE} - L_{AF}}{L_{EF}};$$

$$A = L_0^2 + L_1^2 - L_2^2 + 2L_0 L_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1);$$

$$B = 2L_3(L_0 \cos \varphi_0 + L_1 \cos \varphi_1);$$

$$C = 2L_3(L_0 \sin \varphi_0 + L_1 \sin \varphi_1);$$

$$L_0 = \sqrt{L_{EF}^2 + (L_{DE} - L_{AF})^2};$$

$$L_3 = \sqrt{L_{GF}^2 + (L_{DG} - L_{CH})^2}.$$

Калибровка МГ была выполнена на испытательном одноосевом поворотном стенде, позволяющем совершать вращение по оси рысканья на произвольный угол поворота в диапазоне от  $0^\circ$  до  $300^\circ$  или выполнять обороты более  $360^\circ$  с заданной скоростью.

Стенд собран на основе цифрового программируемого сервопривода SR–508Н, управляемого по интерфейсу RS–485, на валу сервопривода закреплена втулка, которая крепится к поворотной плоскости с установочными креплениями. Стенд использован для проверки соответствия угла, зафиксированного гироскопом, с реальным углом, что необходимо для введения коэффициентов размерности и настройки фильтра ЦОС.

Схема калибровочного стенда МГ приведена на рис. 4.4.

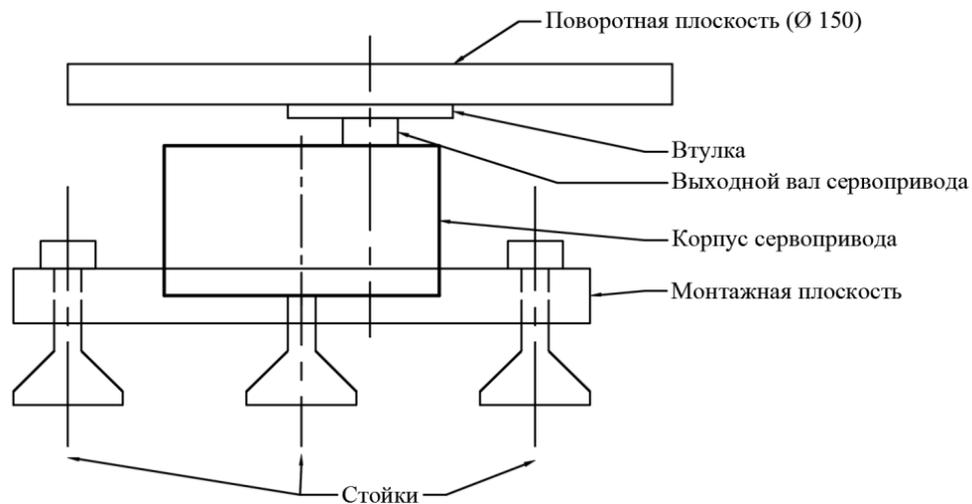


Рисунок 4.4 – Схема калибровочного стенда МГ

### ***Метод калибровки МА и калибровка осей МА***

Калибровка МА выполняется для нивелирования смещения нуля, погрешности выравнивания и устранения несоосности чувствительных осей с корпусом МА. Метод калибровки МА заключается в составлении матрицы калибровочных замеров посредством измерений МА в шести положениях.

МА калибруется по значениям вектора ускорения свободного падения  $-\bar{g}$  в шести положениях, по два для каждой оси координат:  $Z_в$  – верхняя плоскость Z,  $Z_н$  – нижняя плоскость Z,  $Y_в$  – верхняя плоскость Y,  $Y_н$  – нижняя плоскость Y,  $X_в$  – верхняя плоскость X,  $X_н$  – нижняя плоскость X. На основе полученных калибровочных значений рассчитывается матрица углового рассогласования. Калибровка МА осуществляется на основе метода, описанного в литературе [150].

План калибровочных замеров представлен в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – План калибровочных замеров

Позиция	Ось X	Ось Y	Ось Z
$Z_в$	0	0	+1g
$Z_н$	0	0	-1g
$Y_в$	0	+1g	0
$Y_н$	0	-1g	0
$X_в$	+1g	0	0
$X_н$	-1g	0	0

Соотношение между неоткалиброванными показаниями акселерометра и нормализованными значениями определяется следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_x \\ \tilde{a}_y \\ \tilde{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/S_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x - Z_x \\ a_y - Z_y \\ a_z - Z_z \end{bmatrix},$$

где:  $[M_{ij}]$  – квадратная матрица третьего порядка, содержащая коэффициенты углового рассогласования между чувствительными осями акселерометра и корпусом АСМП;  $S_x, S_y, S_z$  – градуировочные коэффициенты;  $Z_x, Z_y, Z_z$  – смещение нуля;  $a_x, a_y, a_z$  – необработанные показания МА;  $\tilde{a}_x, \tilde{a}_y, \tilde{a}_z$  – нормализованные значения МА.

Матрица рассогласования может быть представлена следующим выражением:

$$[\tilde{a}_x \quad \tilde{a}_y \quad \tilde{a}_z] = [a_x \quad a_y \quad a_z][C_{ij}]_{4 \times 3},$$

где  $[C_{ij}]_{4 \times 3}$  – матрица размерности 4x3 искомым калибровочных элементов.

Коэффициенты модели рассчитываются по следующему выражению:

$$C = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot \tilde{A}$$

где:

$$A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ & \dots & & \\ a_{x6} & a_{y6} & a_{z6} & 1 \end{bmatrix} \text{ – матрица с результатами калибровочных замеров;}$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1g \\ 0 & 0 & -1g \\ & \dots & \\ -1g & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ – матрица эталонных результатов.}$$

*Калибровка МА* телеметрического модуля АСМП была осуществлена на откалиброванной горизонтированной поверхности стабилизированного стенда, установленного с точностью не менее  $\Delta = 0,1^\circ$  градуса посредством высокоточного инклинометра Muratta SCA121T–D07.

На рис. 4.5 представлен калибр для установки платы с МА на калибровочный горизонтированный стенд, представляющий конструкцию прямоугольной формы с плоскими сторонами, внутри которого находятся направляющие пазы для установки датчика SCC2230 или SCA3100/SCA3300, плоские грани которого позволяют устанавливать калибр в шести различных положениях, необходимых для калибровки МА. Для расчета матрицы калибровочных элементов произведена серия из шести замеров, после нахождения калибровочной матрицы были рассчитаны градуировочные коэффициенты для МА с целью определения её базирования на плате и несоосности осей.

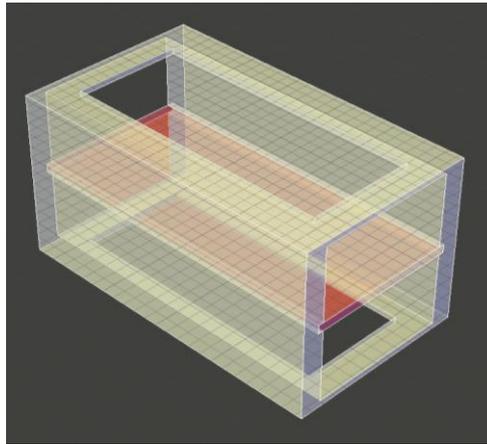


Рисунок 4.5 – Калибр для тестирования МЭМС-датчика SCC2230

Оценка погрешности определения углов наклона ГТМ осуществляется в статическом режиме после определения зависимости угла наклона от ускорения и разрешающей способности приращения угла наклона МА, которая характеризует разницу между истинным и расчетным углом наклона ГТМ в определенном диапазоне.

Допустимый наклон драглайнов –  $\zeta_y^D$  во время шагания ГТМ находится в диапазоне  $-10^\circ \leq \zeta_y^D \leq 10^\circ$ , во время экскавации ГТМ он находится в диапазоне  $-2^\circ \leq \zeta_y^D \leq 2^\circ$ , наклон мехлопат –  $\zeta_y^M$  во время смены позиции ГТМ находится в диапазоне  $-12^\circ \leq \zeta_y^M \leq 12^\circ$ , во время экскавации ГТМ находится в диапазоне  $-3^\circ \leq \zeta_y^M \leq 3^\circ$  град. Учитывая рабочие диапазоны, необходимая точность измерения наклона не менее  $0,1^\circ$  в диапазоне  $-5^\circ \dots +5^\circ$  по осям крена и тангажа. На рис. 4.6 представлен график зависимости значения углов наклона от ускорения в статическом режиме.

Возможно использование линейной или геометрической аппроксимации. При использовании линейной аппроксимации происходит снижение нагрузки на счетно–решающее устройство, вследствие линеаризации возникает небольшая погрешность угла на интервалах в диапазоне от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$  градусов. Линейную аппроксимацию целесообразно использовать при определении углов наклона в

двухосевом режиме по осям крена и тангажа относительно горизонта. Ошибка линейной аппроксимации представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Ошибка линейной аппроксимации

Углы наклона, град.	Ошибка аппроксимации, град
0	0
-1...1	0,0027
-2...2	0,0058
-3...3	0,0094
-4...4	0,0140
-5...5	0,0198
-10...10	0,0787
-15...15	0,2185

Поскольку в АСМП используется трехосевой акселерометр, целесообразно использовать геометрическую аппроксимацию функцией  $\arcsin(C)$ .

Зависимость углов наклона от ускорения трехосевого акселерометра представлена на рис. 4.7.

Определение шумовых характеристик МА выполняется наложенной вариацией Аллана для каждой чувствительной оси акселерометра. Наложённая вариация Аллана описывается следующим выражением:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i]^2,$$

где  $m$  – коэффициент усреднения,  $\tau_0$  – основной интервал измерения,  $M$  – количество измерений для времени усреднения  $\tau = m\tau_0$ ,  $x_i$  –  $i$ -ая выборка из генеральной совокупности данных.

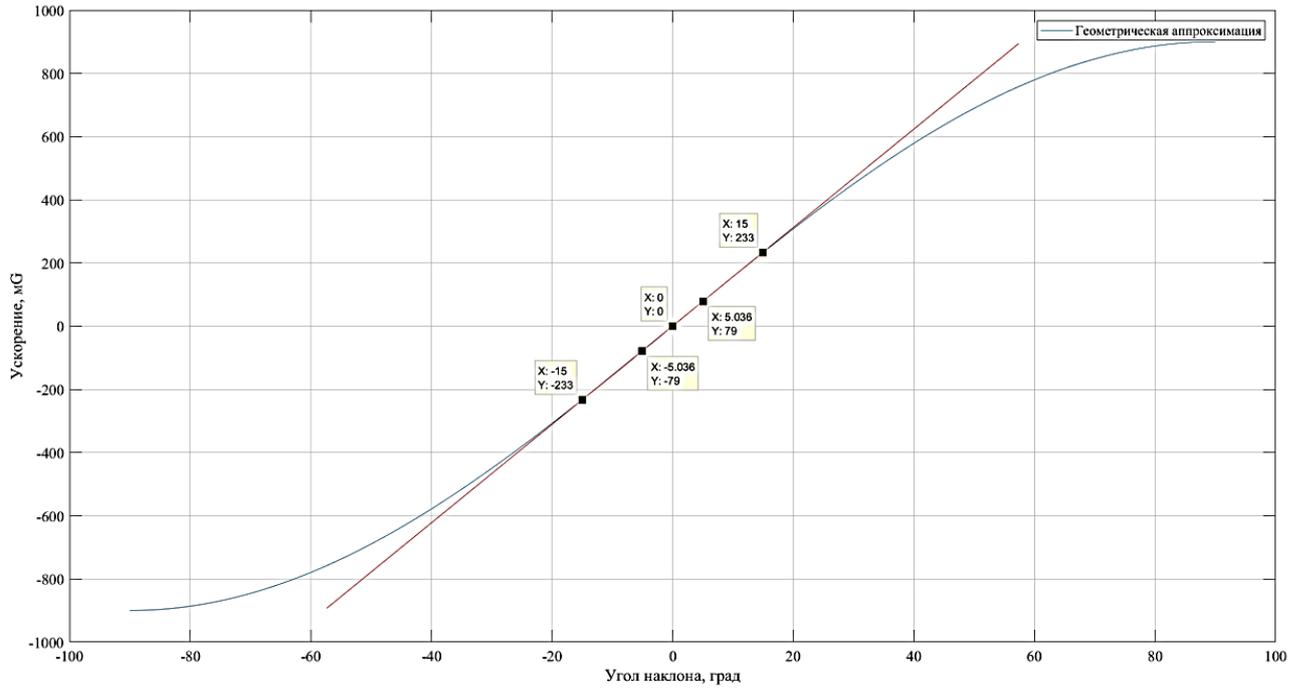


Рисунок 4.6 – Зависимость угла наклона от ускорения при использовании геометрической и линейной аппроксимации

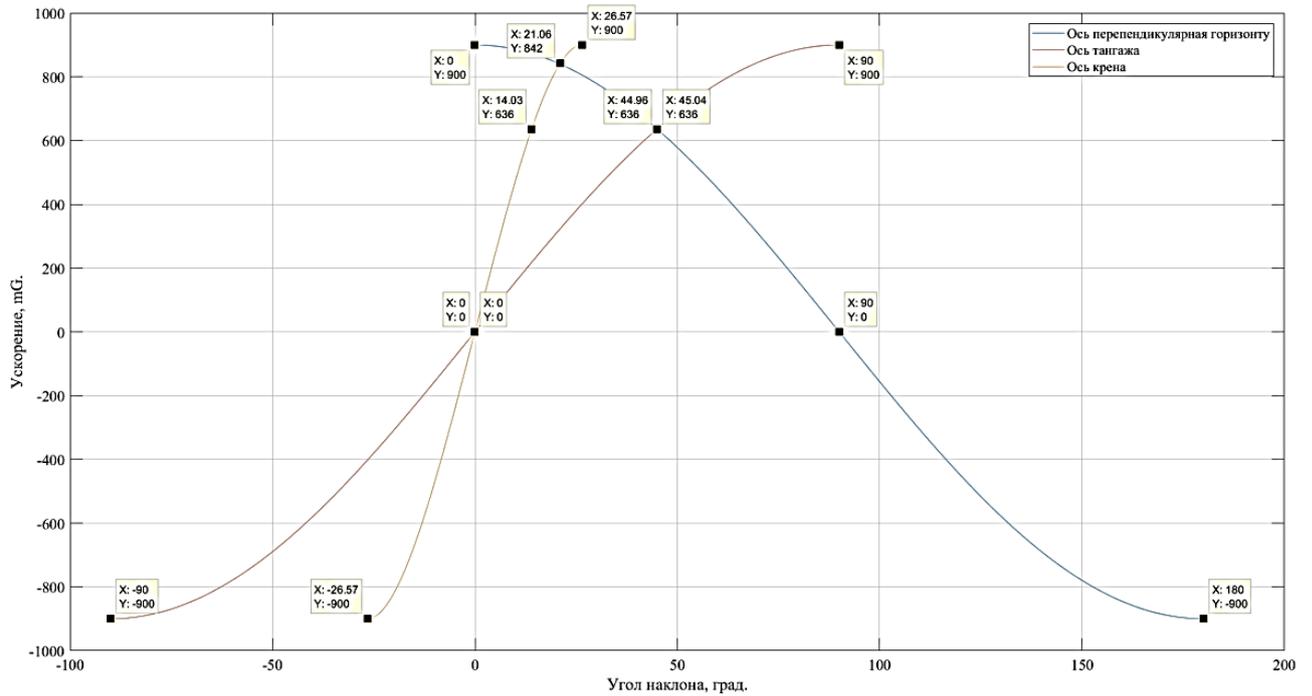


Рисунок 4.7 – Корреляция ускорения в трёхосевом акселерометре

### *Метод калибровки МГ*

Для нивелирования дрейфа угловой скорости  $\omega_0$  и, как следствие, ошибки угловой ориентации, МГ необходимо откалибровать. Калибровка МГ заключается в нахождении масштабного калибровочного коэффициента размерности  $K_\omega$  и определения дрейфа нуля  $\omega_0$  в состоянии покоя.

Нахождение масштабного калибровочного коэффициента  $K_\omega$  осуществляется в определении рассогласования расчетного угла поворота –  $\varphi_p$  с зарегистрированным углом поворота:  $\varphi_3, \varphi_3 - \varphi_p$ . Расчетный угол поворота  $\varphi_p$  задается поворотной платформой, который сравнивается с зарегистрированным углом МГ  $\varphi_3$ . Масштабный коэффициент рассчитывается согласно выражению:

$$\frac{\varphi_p}{\varphi_3} = K_\omega.$$

Определение дрейфа нуля во времени –  $\omega_0$  выполняется наложенной вариацией Аллана, описанной в первой главе диссертации.

*Калибровка МГ*, т.е. определение,  $K_\omega$  было выполнено на поворотном стенде на основе цифрового программируемого сервопривода, позволяющего задавать требуемые углы поворота и угловую скорость.

С целью нахождения масштабного коэффициента размерности была произведена серия замеров для измерения рассогласования углов ориентации  $\varphi_3 - \varphi_p$ . После нахождения рассогласования рассчитывался масштабный коэффициент  $K_\omega$ .

Определение  $\omega_0$  было осуществлено в состоянии покоя наложенной вариацией Аллана. МГ – ADIS16265 выходит на нормальный режим работы через  $t_{стаб}^{ADIS16265} = 150 \text{ сек}$ , МГ – SCC2230 через  $t_{стаб}^{SCC2230} = 200 \text{ сек}$ . Выход на нормальный режим работы характеризуется установившимся средним значением  $\omega_0$ .

После нахождения  $K_\omega$  и  $\omega_0$ , в управляющую программу вводятся поправки. На рис. 4.8 представлена последовательность введения поправок.

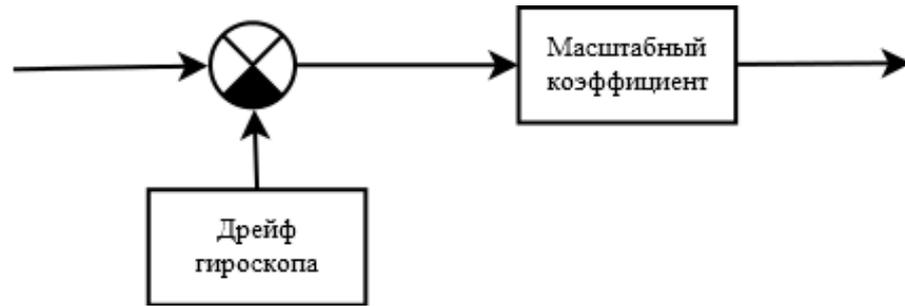


Рисунок 4.8 – Последовательность введения поправок

МГ ADIS1626 имеет в составе калибровочные регистры для внесения  $K_\omega$  и  $\omega_0$  во внутреннюю память для уменьшения вычислительной нагрузки на счетно-решающее устройство. МГ SCC2230 не имеет внутренних калибровочных регистров, введение поправок осуществляется на нижнем уровне программного обеспечения АСМП.

Шаги приращения для ADIS16265:

$$K_\omega = \Delta K_\omega^{ADIS16265} = 0,00048828;$$

$$\omega_0 = \Delta \omega_0^{ADIS16265} = 0,018315 \text{ град/сек}.$$

Проведенная калибровка датчиков МА и МГ, лабораторные исследования алгоритмов цифровой обработки сигналов показали возможность проведения испытания АСМП в производственных условиях.

Таким образом, изготовленное оборудование позволяет выполнять качественную калибровку МЭМС-датчиков, повышает точность идентификации рабочих циклов и точность угловой ориентации.

#### 4.2. Проведение испытаний АСМП в производственных условиях

Опытный образец АСМП прошел два успешных испытания в сентябре 2017 и в марте 2018 года на угольном разрезе «Кедровский», являющимся филиалом компании «Кузбассразрезуголь». Испытания опытного образца АСМП в 2017 году представлены на рис. 4.9, испытания опытного образца АСМП в 2018 году представлены на рис. 4.10.



Рисунок 4.9 – Опытный образец АСМП в 2017 году на экскаваторе ЭШ10/50



Рисунок 4.10 – Система сбора данных в 2018 году на экскаваторе ЭШ10/50

В приложении А представлены акты производственных испытаний АСМП, проводимых на шагающем экскаваторе ЭШ 10/50. Производился сбор, анализ, хранение и отображение данных на экране компьютера в режиме реального времени, вычисления выполнялись на ПЛИС (программируемой логической

интегральной схеме) Zynq-7010 в составе пользовательской реконфигурируемой ячейки NI myRIO.

### ***Последовательность проведения испытаний***

Перед запуском АСМП с помощью профессионального электронного уровня «Ермак 659-034» ( $\Delta=0,05^{\circ}$ ) была выполнена юстировка комплекса, которая заключалась в следующем: полученные углы по крену (ось X) и тангажу (ось Y) с помощью электронного уровня были введены в программу системы управления в качестве поправок начального базирования. После установки АСМП была подключена к бортовой системе электропитания ГТМ – 220 В, 50 Гц.

В марте 2018 года новый модуль ГНСС был установлен на крыше экскаватора при помощи магнитного соединения, после чего был запущен для установки связи с орбитальной спутниковой группировкой.

Произведена калибровка показаний датчика угловой скорости, выборка показаний МГ продолжительностью 200 с для МГ SCC2230 и 150 с для гироскопа ADIS16265 в состоянии покоя.

### ***Результаты производственных испытаний АСМП***

Результаты работы основного телеметрического блока АСМП на основе myRIO записывались в бортовую память и отображались на экране компьютера с помощью интерактивного графического интерфейса. Телеметрический блок фиксировал следующие физические величины ТПЭ: угловую скорость по оси рысканья, линейные ускорения по осям X,Y,Z, пространственные координаты и время. На основе измеренных физических величин были рассчитаны параметры ТПЭ (угловые перемещения и угловая ориентация по оси рысканья, угловая ориентация платформы по осям X,Y,Z), рассчитано время каждого цикла и время работы и простоя ГТМ, места черпания и места разгрузок, выполнена оценка эффективности работы экскаватора ЭШ10/50. На рис. 4.11 показан графический

интерфейс управляющей программы (УП) АСМП в сентябре 2017 года, на рис. 4.12 графический интерфейс УП АСМП в марте 2018 года.

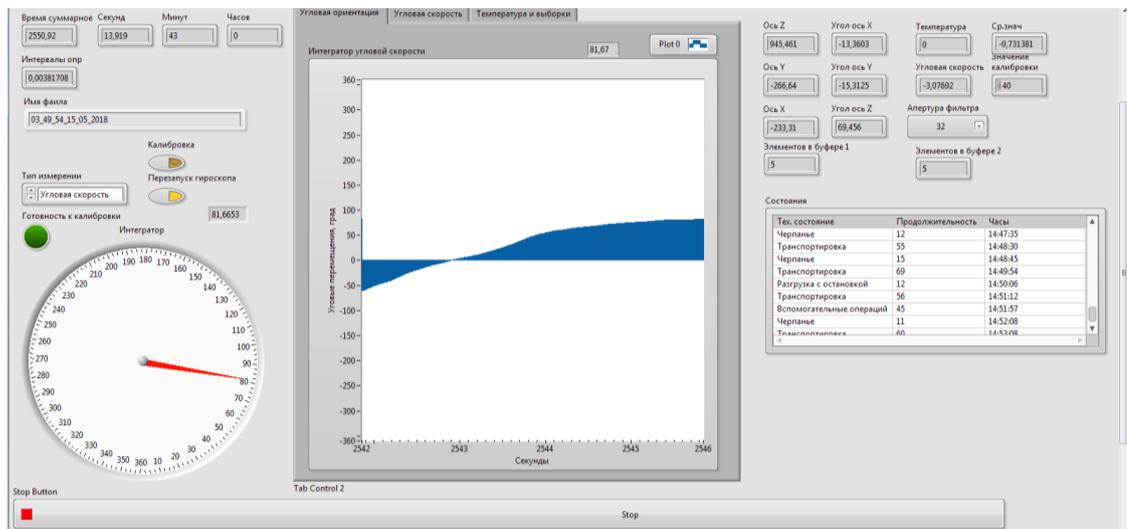


Рисунок 4.11 – Интерфейс УП АСМП в 2017 году

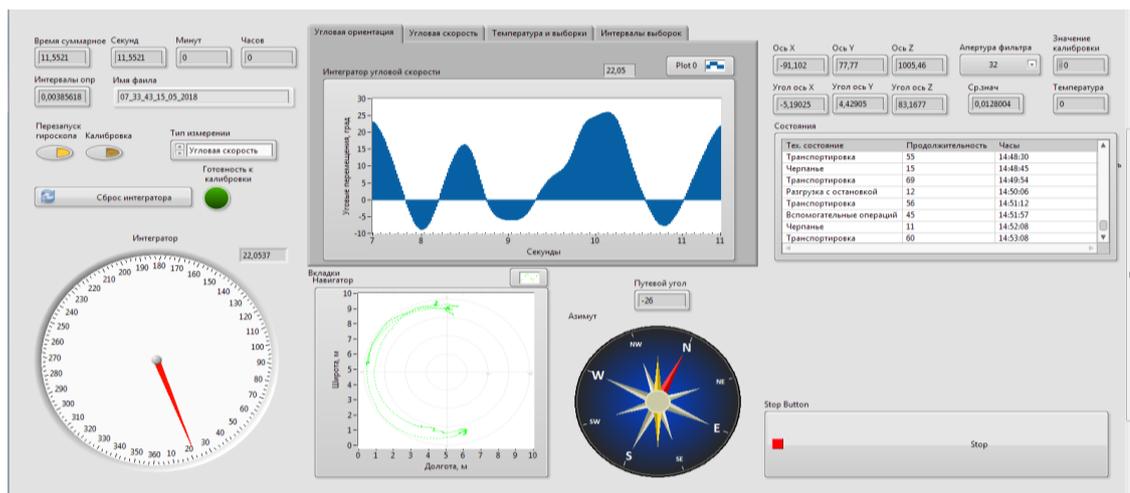


Рисунок 4.12 – Интерфейс УП АСМП в 2018 году

*Испытания АСМП в 2017 году. Состав аппаратного обеспечения опытного образца АСМП (сентябрь 2017 года):*

- 1) МГ – ADIS 16265;
- 2) МА – SCA3100;
- 3) понижающий линейный источник питания с напряжением 3,3 и 5,0 вольт на основе преобразователей LM317;
- 4) высокоточные часы реального времени на основе DS3231;
- 5) вычислительный модуль myRIO.

Состав программного обеспечения высшего уровня опытного образца АСМП (сентябрь 2017 года):

- 1) подпрограмма автокалибровки МГ на основе наложенной вариации Аллана;
- 2) алгоритм коррекции по нулевой скорости (первая версия);
- 3) подпрограмма расчета геометрических, динамических, временных параметров ТПЭ;
- 4) подпрограмма идентификации рабочих циклов.

*Результаты испытаний в АСМП 2017 году:*

- 1) алгоритм калибровки МГ позволил достичь собственного уровня шума угловой скорости  $0,035 \text{ }^\circ/\text{с}$ ;
- 2) АСМП в течение испытания работала стабильно, время непрерывной работы составило 127,5 минут. По графическому интерфейсу наблюдалась постоянная накапливающаяся ошибка по оси рысканья ( $0,85 \text{ }^\circ/\text{мин}$ ), после корректировки она составила ( $0,5 \text{ }^\circ/\text{мин}$ );
- 3) одновременно с записью данных отображалась информация с помощью графического интерфейса: угловой скорости, угловом и линейном ускорении, угловой ориентации платформы экскаватора, времени работы и скорректированной угловой скорости;
- 4) визуальное наблюдение угловой ориентации платформы экскаватора совпадало с информацией, отображаемой графическим интерфейсом;
- 5) использование алгоритма обработки данных позволило значительно нивелировать уровень дрейфа гироскопа и, тем самым, повысить точность определения рабочих циклов;
- 6) разработанный графический интерфейс позволил визуализировать угловые перемещения экскаватора посредством трехмерной графики.

*Недостатки опытного образца АСМП в 2017 году:*

– присутствует накапливающаяся ошибка угловой ориентации, незначительно влияющая на точность идентификации рабочих циклов и не позволяющая точно определять место черпания и разгрузки через непродолжительное время;

– затруднено функционирование алгоритма коррекции по нулевой скорости, при длительной работе 8–10 часов возможен переход АСМП в неустойчивый режим;

– присутствуют ложные идентификации состояния «черпание» или «разгрузка» при серии нескольких коротких повторяющихся состояний «вспомогательные операции»;

– АСМП имеет различную реакцию и точность идентификации при работе различных экипажей технологических машин и внешних условий работы.

Вывод: В результате производственных испытаний выявлены незначительные недостатки, которые ухудшают качество функционирования АСМП, но позволяют выполнять мониторинг на приемлемом уровне.

*По результатам производственных испытаний в сентябре 2017 года комиссия в составе главного инженера и старшего механика постановила:*

– рекомендовать использовать разработанный в КузГТУ и ТУСУРе аппаратно – программный комплекс на шагающих экскаваторах угольных разрезов Кузбасса для постоянного мониторинга горизонтальности платформы и учета рабочих циклов горной технологической машины за фиксированный промежуток времени и информирования машиниста о критических режимах работы экскаватора.

Вывод: Большая часть выявленных недостатков не оказывает существенного влияния на выполнение мониторинга ГТМ. Устранение выявленных недостатков осуществляется за счет развития отдельных элементов АСМП.

Одним из возможных направлений устранения недостатков АСМП – разработка блока ГНСС и модуля связи стандарта RS–232 для подключения блока ГНСС к телеметрическому блоку АСМП. Для исследования функционирования и рабочих характеристик альтернативной элементной базы в состав АСМП добавлен МГ SCC2230, показавший меньшую точность и большую сложность в эксплуатации.

*Испытания АСМП в 2018 году.* Состав аппаратного обеспечения опытного образца АСМП (март 2018 года):

- 1) МГ – ADIS 16265;
- 2) МА, МГ – SCC2230;
- 3) МА–SCA3100;
- 4) понижающий линейный источник питания с напряжением 3,3 и 5,0 В. на основе преобразователей LM317;
- 5) высокоточные часы реального времени на основе DS3231;
- 6) вычислительный модуль myRIO;
- 7) модуль связи RS–232 на основе MAX3232;
- 8) блока ГНСС на основе модуля Ublox Neo–M8T.

Состав программного обеспечения высшего уровня опытного образца АСМП (март 2018 года):

- 1) подпрограмма автокалибровки МГ на основе наложенной вариации Аллана;
- 2) рывковый фильтр и программа идентификации динамического состояния платформы ГТМ;
- 3) алгоритм коррекции по нулевой скорости;
- 4) алгоритм автоподстройки коэффициентов усиления фильтра Маджвика;
- 5) подпрограмма коррекции работы фильтра Маджвика посредством ГНСС;
- 6) подпрограмма идентификации рабочих циклов;
- 7) комплексирующий фильтра Маджвика.

*Результаты испытания АСМП в 2018 году:*

- 1) после калибровки собственный уровень шума гироскопа ADIS16265 составил 0,12 %/с, уровень шума гироскопа SCC2230 составил 0,43 %/с;
- 2) время непрерывной работы АСМП составило 245,5 мин, АСМП в течение всего периода работала стабильно;
- 3) вся информация об угловом положении телеметрического блока вокруг трех осей X, Y и Z, а также пространственные координаты записывалась на съемный FLASH-носитель;
- 4) одновременно с записью данных отображалась информация с помощью графического интерфейса: об угловой скорости, угловом линейном ускорении, угловой ориентации платформы экскаватора, времени работы, скорректированной угловой ориентации;
- 5) визуальное наблюдение угловой ориентации платформы экскаватора совпадало с информацией, отображаемой графическим интерфейсом;
- 6) использование нового алгоритма коррекции угловой ориентации посредством ГНСС позволило обеспечить высокую точность и стабильность угловой ориентации в любой абсолютный момент времени.

Выявлены следующие *недостатки* опытного образца АСМП:

- алгоритм коррекции чувствителен к количеству видимых спутников орбитальной группировки ГНСС;
- затруднена работа алгоритма коррекции в глубоких котлованах и на участках со сложным рельефом.

*В результате производственных испытаний в марте 2018 года* комиссия в составе главного инженера и старшего механика постановила:

- использовать разработанный в ТУСУРе аппаратно – программный комплекс на шагающих экскаваторах угольных разрезов Кузбасса с целью постоянного мониторинга горизонтальности платформы и учёта рабочих циклов ГТМ за фиксированный промежуток времени;
- в качестве аппаратного обеспечения рекомендовать использование гироскопа ADIS16265, акселерометров SCA3300 или SCA3100;

– начать выпуск установочной серии АСМП.

Вывод: Разработанный алгоритм коррекции фильтра Маджвика посредством ГНСС позволяет на протяжении длительного времени функционировать АСМП автономно с точностью, достаточной для выполнения мониторинга и идентификации мест разгрузок и черпания/копания.

В случае недостаточного сигнала для работы ГНСС эффективным решением является использование фильтра Махони, который значительно замедляет скорость накопления ошибки ориентации.

### **4.3. Сравнение разработанной АСМП с аналогами**

Основные отличия разработанной АСМП от существующих аналогов систем автоматизированного мониторинга ГТМ.

1. АСМП унифицирована, функционирует на драглайнах и мехлопатах;
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, а не за ходом выполнения ТПЭ. АСМП отслеживает направление стрелы и горизонтальность платформы ГТМ, но не отслеживает местоположение ковша;
4. АСМП не осуществляет прямую оценку результатов ТПЭ, косвенная оценка выполняется анализом 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.

#### **4.4. Перспективы развития АСМП и выводы по четвертой главе**

Проведенные испытания в производственных условиях показали, что опытный образец АСМП выполняет основные задачи, определенные в техническом задании: заказчик готов к тестированию установочной партии АСМП.

##### ***Перспективы развития АСМП***

Модернизация АСМП позволит расширить функциональные возможности ГТМ, повысить качество мониторинга ТПЭ, автоматизирует операции по обеспечению эффективного бесперебойного функционирования ГТМ.

Одним из главных направлений модернизации является использование высокоточного навигационного оборудования для определения пространственных координат ГТМ и повышения эффективности алгоритмов идентификации ТПЭ ГТМ.

Другим направлением модернизации является использование алгоритмов машинной классификации и обучения, что позволит реализовать метод машинного обучения – «обучение от всех».

##### ***Выводы по четвертой главе***

1. Результаты двух производственных испытаний АСМП подтвердили обоснованность выбранных аппаратных и программных решений: идентификация рабочих циклов осуществляется с точностью до 86 % в комплектации с комбинированным МА и МГ SCC2230 и с точностью до 92 % в комплектации с МГ ADIS16265 и МА SCA3100/ SCA3300.

2. Алгоритм коррекции комплексирующего фильтра Маджвика осуществляет коррекцию с абсолютной погрешностью не менее 5° в комплектации МГ ADIS 16265 и МА SCA3100/SCA3300 и 9° в комплектации МА и МГ SCC2230 при использовании приёмника ГНСС – UBLOX NEO-M8T.

3. Разработанные калибровочные стенды позволяют выполнять тестирование и калибровку МА и МГ, оценку точности и отладку фильтров для цифровой обработки сигналов.

4. По результатам испытания экспертная комиссия компании «Кузбассразрезуголь» рекомендовала «использовать разработанный в ТУСУРе аппаратно–программный комплекс (АСМП) на шагающих экскаваторах угольных разрезов Кузбасса с целью постоянного мониторинга горизонтальности платформы и учёта рабочих циклов технологической машины за фиксированный промежуток времени» и предложила начать выпуск установочной серии АСМП. Акты о промышленных испытаниях с рекомендациями комиссии представлены в приложении А.

5. Проведенные исследования показали, что разработанная АСМП может быть модернизирована за счет применения высокоточного навигационного оборудования и доработки существующего программного обеспечения, внедрением алгоритмов машинной классификации и самообучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения по разработке и исследованию автоматизированной системы мониторинга и позиционирования функциональных элементов горных технологических машин, имеющие существенное значение для развития угледобывающей промышленности страны. Итогом работы являются следующие результаты:

1. Проведен аналитический обзор существующих средств автоматизированного мониторинга и позиционирования 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, позволяющий 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 комплексующих фильтров и различных сервисных программ. Обработка и исследование данных частично выполнена в программной среде MATLAB R2017b.

6. Разработано и протестировано программное и алгоритмическое обеспечение АСМП. Выполнено тестирование разработанных программ: сбора и предварительной обработки данных, программы идентификации технологического состояния ГТМ, комплексующего 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 разработана и исследована АСМП функциональных элементов ГТМ, которая успешно прошла промышленные испытания в условиях разреза «Кедровский» УК «Кузбассразрезуголь».

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенный и исследованный новый метод идентификации технологического процесса экскавации, анализа рабочих состояний ГТМ и динамических

характеристик ГТМ, позволяет оценить качество выполнения ТПЭ; разработанный метод коррекции комплексирующего фильтра Маджвика посредством ГНСС по оси рысканья обеспечивает устойчивое функционирование АСМП.

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

Система может быть рекомендована для использования в производственном процессе ТПЭ, АСМП позволит выполнять автоматизированный мониторинг динамических, геометрических, временных параметров, оценку качества ТПЭ, идентификацию технологического состояния ГТМ, повысит безопасность, надежность, качество выполняемых работ, обеспечит энерго и ресурсосбережение.

Предложенный метод коррекции комплексирующего фильтра Маджвика может быть рекомендован для применения в различных областях науки и техники.

Метод функционирования АСМП (применение МЭМС-датчиков динамических величин, не требующий включения в контур ГТМ), может быть использован и на других типах ГТМ (карьерные буровые станки и др.), а также в строительстве (технология бестраншейной прокладки коммуникаций на территории существующей застройки) и военно-промышленном комплексе (стабилизированные грузовые и рабочие участки на морских кораблях и т.д.).

Разработанный метод оценки эффективности функционирования ГТМ на основе алгоритма идентификации основных технологических состояний ГТМ позволит снизить время простоя, оптимизировать выполнение некоторых операций ТПЭ.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Aykul H. Equipment selection for high selective excavation surface coal mining / H. Aykul, E. Yalcin, I.G. Ediz, D.W. Dixon-Hardy, H. Akcakoca // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, – 2007. – Т. 107. – №. 3. – P. 195.
2. Kalra V. M. Operational Analysis of Mining Equipment in Opencast Mine using Overall Equipment Effectiveness (OEE) / V. M. Kalra, T. Thakur, B. S. Pabla // IOSR–Journal of Mechanical and Civil Engineering, Special Issue of National Conference on Advances in Engineering, Technology & Management. – 2015. – pp. 27–31.
3. P. Rai. Performance Assessment of Draglines in Opencast Mines / Rai P. // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, – 2004. – Vol. 11. – pp. 493–498.
4. Певзнер, Л.Д. К проблеме автоматизированного управления шагающим экскаватором-драглайном / Л.Д. Певзнер, И.С. Югай, Т. З. Сулейменов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №. 7. –С. 285–291.
5. Певзнер, Л.Д. Автоматизированная система нечеткого управления движением ковша драглайна / Л.Д Певзнер, И. С. Югай, Т. З. Сулейменов // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – №. 8. – С. 23–28.
6. Ломакин, М.С. Автоматизированная система управления взаимодействием электроприводов подъема и тяги мощного экскаватора–драглайна в процессе копания / М.С. Ломакин, А. М. Ромашенков, А. М. Самойленко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – №. 2. –С.67–70.
7. Хайруллин, Р.З. Автоматическое управление динамическими нагрузками в электромеханических системах экскаватора-драглайна при черпании / Р.З. Хайруллин //Вестник МГСУ. – 2012. – №. 7. –С. 125–129.
8. Щелков, П. Ю. Имитационная модель сетевой системы управления электрооборудованием мощного шагающего экскаватора-драглайна / П.Ю.

Щелков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 6. –С.137–146.

9. Гордеев–Бургвиц, М.А. Разработка цифро-аналоговой САУ электроприводами шагающего драглайна / М.А. Гордеев–Бургвиц //Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – №. 4. – С. 84–86.

10. Тайзар Линн. Автоматизированный мониторинг технологического процесса шагающего экскаватора драглайна: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06 / Дуань Хунмэй. – М., 2010. – 104 с.

11. Halatchev R.A. Spatial variability of shovel dig performance / R.A. Halatchev, P.F. Knights //International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2007. – Т. 21. – №. 4. – pp. 244-261.

12. Hall, A. S. and McAree, P. R. A study of the interaction between operator style and machine capability for a large hydraulic excavator. J. Mech. Eng. Sci., 2005. 219 –pp. 477–489.

13. Westcott P. Open-cut mining / P. Westcott, G. Pitkin, T. Aspinall //Australasian Coal Mining Practice. – 2009. – pp. 410–458.

14. Bricker M.L. and Key J.R., "Dragline stripping methods enhanced by explosives casting at Bridger coal mine", Mining Engineering (April 1991), 392-394.

15. Chugh YP. and Ehie I., "Evaluation of selected pit configurations for surface mining a moderately pitching coal seam", Trans. Amer. Inst. Min. Eng. 280 (1987), 1823–1828.

16. Denby B. and Schofield D., "Dragline Selection using intelligent computer techniques", Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A: Min. industry) 101 (May-August 1992), A79-A84.

17. Singhal R.K., Naidu H.G. and Singh S.P., "Influence of blasting techniques on open pit economics", Mining Engineering (1989), 95-98.

18. Hrebar Matthew J., Cook J., Henry C // Estimating dragline productivity using a graphic microcomputer program // Surface Mining. -1987. -1, -№ 4. – с. 251-255.

19. Jones B.T. Dragline maintenance engineering / B.T. Jones // University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Qld, Australia. Bachelor thesis. –2007. –P. 71.
20. Gupta S. Maintenance resource prioritization in a production system using cost-effective importance measure / S. Gupta, U. Kumar // International Workshop and Congress on eMaintenance: 22/06/2010-24/06/2010. – Luleå tekniska universitet, 2010. – pp. 196–204.
21. Humphrey J.D. Mechanical extraction, loading, and hauling / J.D. Humphrey, J.D. Wagner // SME mining engineering handbook. – 2011. – pp. 903–929.
22. Каталог фирмы MineWare. Обзор систем «Pegasys», «Argus», «mRoc». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static1.squarespace.com/static/54a3665fe4b09569a12e073b/t/551df832e4b0fda375a59f20/1428027442088/MineWare-Systems-Overview.pdf>. Дата обращения: 23.05.2018.
23. New MineWare technology meets growing demand for real-time, actionable mining information. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clare-masters.squarespace.com/new-mineware-technology-meets-growing-demand-for-realtime-actionable-mining-information>. Дата обращения: 23.05.2018.
24. Connolly M., Jassetta A. Integrated Support Centres – the future of dragline fleet monitoring // Procedia Engineering. – 2014. – № 83. – P. 90–99.
25. Каталог фирмы TOPCON. Системы управления строительной техникой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.gsi.ru/file/mc\\_gsi.pdf?20180219](https://www.gsi.ru/file/mc_gsi.pdf?20180219). Дата обращения: 23.05.2018.
26. Оборудование TOPCON. Каталог систем управления строительной техникой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://topcon.nt-rt.ru/images/showcase/catalog.pdf>. Дата обращения: 23.05.2018.
27. Решения TOPCON для экскаваторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gsi.ru/art.php?id=579>. Дата обращения: 23.05.2018.
28. Системы нивелирования для экскаваторов фирмы Trimble [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[http://gtdv.ru/uploads/images/productfile/1397686222\\_sau\\_ekskavatory.pdf](http://gtdv.ru/uploads/images/productfile/1397686222_sau_ekskavatory.pdf). Дата обращения: 23.05.2018.

29. Сайт компании «Макон». Системы нивелирования Prolec для экскаваторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://prolec.ru/catalog/sistemi\\_nivelirovaniya/](https://prolec.ru/catalog/sistemi_nivelirovaniya/). Дата обращения: 23.05.2018.

30. Система нивелирования для экскаватора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geostar.com.ua/products/sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-prolec/sistema-nivelirovaniya-dlya-ehkkskavatora>. Дата обращения: 23.05.2018.

31. Система для экскаваторов LEICA iCON excavate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://istk.ru/service/navesnoe-oborudovanie/navesnoe-oborudovanie-dlya-e-kskavatorov/sistema-dlya-ekskavatorov-leica-icon-excavate/>. Дата обращения: 23.05.2018.

32. Системы нивелировки на экскаваторы семейства XSITE. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moba-3d.ru/system-automatic-nivelirovka/excavator>. Дата обращения: 23.05.2018.

33. Системы автоматической нивелировки для землеройной строительной техники "МОБА" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.korrus.ru/produksiya/sistemy-avtomaticheskoy-nivelirovki-dlya-zemleroynoy-stroitelnoy-tekhniki-moba-germaniya/#ankor](http://www.korrus.ru/produksiya/sistemy-avtomaticheskoy-nivelirovki-dlya-zemleroynoy-stroitelnoy-tekhniki-moba-germaniya/#ankor). Дата обращения: 23.05.2018.

34. Система нивелирования САУРО [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://belgidrosila.ru/sistemy-nivelirovaniya/>. Дата обращения: 23.05.2018.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. Технология точного локального трехмерного нивелирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://topcon.pro/tehnologii/lps\\_technology/](https://topcon.pro/tehnologii/lps_technology/). Дата обращения: 23.05.2018.

40. Технология спутникового трехмерного нивелирования с миллиметровой точностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://topcon.pro/tehnologii/millimeter\\_technology/](https://topcon.pro/tehnologii/millimeter_technology/). Дата обращения: 23.05.2018.

41. Madgwick S.O.H. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm / S.O.H. Madgwick, A.J.L. Harrison, R Vaidyanathan // Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on. – IEEE, 2011. – pp. 1–7.

42. IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/>. Дата обращения: 23.05.2018.

43. Cavallo A. Experimental comparison of sensor fusion algorithms for attitude estimation / A. Cavallo, A. Cirillo, P. Cirillo, G. De Maria // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Т. 47. – №. 3. – pp. 7585-7591.

44. A comparison of multisensor attitude estimation algorithms Cirillo, Pasquale & Cirillo, Andrea & De Maria, G & Natale, Ciro & Pirozzi, Salvatore. Multisensor Attitude Estimation: Fundamental Concepts and Applications Chapter: 29, CRC Press, pp. 529-539, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[https://www.researchgate.net/publication/303738116\\_A\\_comparison\\_of\\_multisensor\\_attitude\\_estimation\\_algorithms](https://www.researchgate.net/publication/303738116_A_comparison_of_multisensor_attitude_estimation_algorithms). Дата обращения: 23.05.2018.

45. Project-specific collection of technical information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lewpayne.blogspot.com/2010/06/oteher.html>. Дата обращения: 23.05.2018.

46. Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter / E. Foxlin // Virtual Reality Annual International Symposium, 1996., Proceedings of the IEEE 1996. – IEEE, 1996. – pp. 185–194.

47. Barshan B. Inertial navigation systems for mobile robots / B. Barshan, H.F. Durrant-Whyte // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1995. – Т. 11. – №. 3. – pp. 328-342.

48. Luinge H. J. Estimation of orientation with gyroscopes and accelerometers / H. J. Luinge, P. H. Veltink, C.T.M. Baten // [Engineering in Medicine and Biology, 1999. 21st Annual Conference and the 1999 Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society] BMES/EMBS Conference, 1999. Proceedings of the First Joint. – IEEE, 1999. – Т. 2. – vol. 2. – pp.844.

49. Marins J. L. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors / J. L. Marins, Xiaoping Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee, M. J. Zyda // Intelligent Robots and Systems, 2001. –:Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on. – IEEE, 2001. – Т. 4. – pp. 2003–2011.

50. Xsens Technologies B.V. MTi and MTx User Manual and Technical Documentation. Pantheon 6a, 7521 PR Enschede, The Netherlands, May 2009.

51. MicroStrain Inc. 3DM-GX3 -25 Miniature Attitude Heading Reference Sensor. 459 Hurricane Lane, Suite 102, Williston, VT 05495 USA, 1.04 edition, 2009.

52. VectorNav Technologies, LLC. VN -100 User Manual. College Station, TX 77840 USA, preliminary edition, 2009.

53. InterSense, Inc. InertiaCube2+ Manual. 36 Crosby Drive, Suite 150, Bedford, MA 01730, USA, 1.0 edition, 2008.

54. PNI sensor corporation. Spacepoint Fusion. 133 Aviation Blvd, Suite 101, Santa Rosa, CA 95403-1084 USA.

55. Crossbow Technology, Inc. AHRS400 Series User's Manual. 4145 N. First Street, San Jose, CA 95134, rev. c edition, February 2007.
56. Sabatini A. M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing / A. M. Sabatini // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2006. – T. 53. – №. 7. – pp. 1346–1356.
57. Kallapur A. A robust gyroless attitude estimation scheme for a small fixed-wing unmanned aerial vehicle / A. Kallapur, I. Petersen, S. Anavatti // Asian Control Conference –:ASCC 2009. 7th. – IEEE, 2009. – pp. 666–671.
58. Luinge H.J. Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers / H.J. Luinge, P.H. Veltink // Medical and Biological Engineering and computing. – 2005. – T. 43. – №. 2. – pp. 273–282.
59. Jurman D. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system / D. Jurman, M. Jankovec, R. Kamnik, M. Topic // Sensors and Actuators A: Physical. – 2007. – T. 138. – №. 2. – pp. 411-420.
60. Haid M. Low cost inertial orientation tracking with Kalman filter / M. Haid, J. Breitenbach // Applied Mathematics and Computation. – 2004. – T. 153. – №. 2. – C. 567–575.
61. Roetenberg D. Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation / D. Roetenberg, H. J. Luinge, C.T.M. Baten, P.H. Veltink. // IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, – 2005. – T. 13. – №. 3. – pp. 395–405.
62. Crassidis J.L. Unscented filtering for spacecraft attitude estimation / J. L. Crassidis, F.L. Markley // Journal of guidance, control, and dynamics, – 2003. – T. 26. – №. 4. – pp. 536–542.
63. Gebre-Egziabher. D. Design of multi-sensor attitude determination systems / D. Gebre-Egziabher, R.C. Hayward, J.D. Powell // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, – 2004. – T. 40. – №. 2. – C. 627–649.
64. Phuong N.H.Q. A DCM based orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass / N.H.Q. Phuong, Y.S. Ro, H.J. Kang // Journal of Universal Computer Science, 2009. – vol. 15 (4). – pp. 859–876.

65. Daniel Choukroun. Novel methods for attitude determination using vector observations. PhD thesis, Israel Institute of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, May 2003.
66. Hyde R. A. Estimation of upper-limb orientation based on accelerometer and gyroscope measurements / R. A. Hyde, L. P. Ketteringham, S. A. Neild, R. J. S. Jones // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2008. – Т. 55. – №. 2. – pp. 746–754.
67. Hong S. K. Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV) / K.S. Hong // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – Т. 107. – №. 2. – pp. 109–118.
68. Ojeda L. Flexnav: fuzzy logic expert rule-based position estimation for mobile robots on rugged terrain. / L. Ojeda, J. Borenstein // In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '02, May 11–15, 2002. – vol. 1. –pp. 317–322.
69. Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter: bachelor's thesis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU\\_data\\_processing\\_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU_data_processing_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y). Дата обращения: 23.05.2018.
70. 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.
71. 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.
72. Vasconcelos J.F. Discrete-time complementary filters for attitude and position estimation: Design, analysis and experimental validation/ J.F. Vasconcelos, B.

Cardeira, C. Silvestre, P. // Control Systems Technology. IEEE Transactions on, 2011. – vol.19. –pp. 181 – 198.

73. Мансур, М. Комплементарный фильтр в задачах комплексной обработки избыточных измерений / М. Мансур, О.А. Степанова // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. ВИ Ульянова (Ленина), 2015. – №. 1. – С. 380–384.

74. Yoo T.S. Gain–Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System / T. S. Yoo, S.K. Hong // Sensors, 2011. – vol. 11. – pp. 3816-3830.

75. Wu Jin. Fast Complementary Filter for Attitude Estimation Using Low-Cost MARG Sensors / Jin Wu at el // IEEE Sensors Journal. –.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. – vol. 16 (18). – pp. 6997–7007.

76. Min H.G. Complementary filter design for angle estimation using mems accelerometer and gyroscope / H.G. Min, E. T. Jeung // Department of Control and Instrumentation, Changwon National University. – Changwon, Korea, – 2015. – pp. 641–773.

77. Lai Y.C. Development of a low–cost attitude and heading reference system using a three–axis rotating platform / Y. C. Lai, S.S. Jan, F.B Hsiao // Sensors. – 2010. – T. 10. – №. 4. – pp. 2472–2491.

78. Collinson R. P. G. Introduction to avionics systems / R.P.G Collinson. – Springer Science & Business Media, 2013. –pp. 547.

79. Direction cosine matrix IMU: Theory [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://www.researchgate.net/publication/265755808\\_DCM\\_IMU\\_Theory](https://www.researchgate.net/publication/265755808_DCM_IMU_Theory). Дата обращения: 23.05.2018.

80. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / S. Madgwick //Report x-io and University of Bristol (UK). – 2010. – T. 25. – pp. 32.

81. Mahony R. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group / R. Mahony, T. Hamel, J. M. Pflimlin // *IEEE Transactions on automatic control*. – 2008. – T. 53. – №. 5. –pp. 1203–1218.
82. Mahony. R. Complementary filter design on the special orthogonal group / R. Mahony at el // *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 (CDC-ECC'05)*. – Seville, Spain: – 44th IEEE Conference, 2005. – pp.1477–1484.
83. Hamel T. Attitude estimation on  $SO[3]$  based on direct inertial measurements / T. Hamel at el // *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'06)*. – Orlando, Fla, USA: IEEE, 2006. – pp. 2170–2175.
84. Hua M. D. Implementation of a nonlinear attitude estimator for aerial robotic vehicles / M.D. Hua et al // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014. – vol. 22. – №. 1. – pp. 201-213.
85. G. Baldwin. Complementary filter design on the Special Euclidean group  $SE(3)$  / Baldwin G at el // *In Proceedings of the European Control Conference*. – Greece, Athens: – IEEE, 2007. №. 1. – pp. 3763–3770.
86. Velocity aided attitude estimation on  $SO(3)$  with sensor delay / A. Khosravian at el // *In Proceedings of the IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC '14)*. – Los Angeles, Calif, USA: – IEEE, 2014. – pp. 114–120.
87. Mahony R. Nonlinear attitude observers on  $SO(3)$  for complementary and compatible measurements: a theoretical study / R. Mahony et al // *In Proceedings of the 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Held Jointly with the 28th Chinese Control Conference (CDC/CCC '09)*. – Shanghai, China: – IEEE, 2009. – pp. 6407–6412.
88. Hyyti H. A. A DCM based attitude estimation algorithm for low-cost MEMS IMUs /H. Hyyti, A. Visala // *International Journal of Navigation and Observation*. – 2015. – T. 2015. –pp. 19.
89. Gui P. MEMS based IMU for tilting measurement: Comparison of complementary and Kalman filter based data fusion / P. Gui, L. Tang, S.

Mukhopadhyay //Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015 IEEE 10th Conference on. – IEEE, 2015. – pp. 2004-2009.

90. Ludwig S.A. Comparison of Euler Estimate using Extended Kalman Filter, Madgwick and Mahony on Quadcopter Flight Data / S. A. Ludwig, K. D. Burnham // 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas, TX, 2018, pp. 1236-1241. –DOI: 10.1109/ICUAS.2018.8453465

91. Khosravian A. Observers for invariant systems on Lie groups with biased input measurements and homogeneous outputs / A. Khosravian et al // –.: Automatica. 2015. – № 55, – pp. 19–26.

92. Литвин, М.А. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации / М.А. Литвин [и др.]. // Информационные процессы. – 2014. – Т. 14. – №. 4. – С. 326–339.

93. 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. – №. 1-2. – С. 53-55.

94. Quang M. Lam. Gyro modeling and estimation of its random noise sources / M. Lam Quang, Stamatakos N, Woodruff C., Ashton S // – .:AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2003. – 12 p.

95. Матвеев, В. В. Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариаций Аллана / В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №. 3. – С. 123–135.

96. Hou H. Modeling inertial sensors errors using Allan variance / H. Hou // –.: University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2004. – P. 147.

97. Аллан, Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения / Д.У. Аллан // Гироскопия и навигация. – 2015. – №. 4. – С. 3– 28.

98. Dobrogowski A. Methods of real–time calculation of Allan deviation and time deviation / A. Dobrogowski, M. Kasznia // Advances in Electronics and Telecommunications. – 2010. – Т. 1. – №. 2. – P. 42 – 46.

99. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Ф.Риле; пер. с англ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с. – ISBN 978–5–9221–1096–9
100. Павлов Д. В. Методика оценки спектрального состава шума в канале акселерометра инерциального навигационного модуля / Д.В. Павлов, М.Н. Петров // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2016. – №. 7 (98). – С.85–89.
101. Barreda Pupo L. Characterization of errors and noises in MEMS inertial sensors using Allan variance method: дис. ... магистра – .: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016. – P. 83.
102. Riley. W.J. Handbook of Frequency Stability Analysis / W.J. Riley. – .: Hamilton Technical Services Beaufort, SC 29907 USA. – 2007. –P. 148.
103. Матвеев, В. В. Исследование погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы высокодинамичного летательного аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – №. 12–1. – С. 165 – 173.
104. Сысоева, С. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач / С. Сысоева // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. – №. 7. – С. 80 – 89.
105. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 1. Автомобильные акселерометры — важнейший сегмент в конъюнктуре современного рынка автомобильных датчиков / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. –С. 32–38.
106. Шахнович, И. МЭМС-гироскопы-единство выбора / И. Шахнович //Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – №. 1. – С. 76-85.
107. Сысоева, С. Датчики инерции за пределами автомобильных применений / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – № 7. –С. 58–66.
108. Everything about STMicroelectronics’3-Axis Digital MEMS Gyroscopes, TA0343, Technical article [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elecrow.com/download/TA0343.pdf>. Дата обращения: 23.05.2018.

109. Сысоева, С. Автомобильные гироскопы / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – № 1. –С. 40–50.

110. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 2. Автомобильные акселерометры — ключевые фигуры систем безопасности и комфорта / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. –С. 26–31.

111. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 3. –С. 10–17.

112. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых емкостных акселерометров / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 4. –С. 28–39.

113. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 6. Некоторые уникальные технологии. Итоговый сравнительный анализ и оценка перспектив / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5. –С. 58–66.

114. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 2. –С. 42–49.

115. Государственный научный центр Российской Федерации АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.elektropribor.spb.ru/katalog/](http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/). Дата обращения: 23.05.2018.

116. АО «ГИРООПТИКА» микромеханические инерциальные навигационные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gyro.ru/onas/>. Дата обращения: 23.05.2018.

117. АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rpkb.ru>. Дата обращения: 23.05.2018.

118. ФГУП "НИИ Физических измерений" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russianspacesystems.ru/holding/struktura/niifi/>. Дата обращения: 23.05.2018.

119. Предприятие «Гиrolаб» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gyrolab.ru/>. Дата обращения: 23.05.2018.

120. Ozyagcilar T. Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft-iron Interference / T. Ozyagcilar // Freescale Semiconductor Ltd., Application Note (AN4246) .– 2012. – С. 1-17 [Электронный ресурс]: электронная версия. – Режим доступа: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4246.pdf>. Дата обращения: 23.05.2018.

121. Ozyagcilar T. Implementing a Tilt–Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors / T. Ozyagcilar //Freescale semiconductor Ltd., Application Note (AN4248). – 2012. –С. 1–22 [Электронный ресурс]: электронная версия. – Режим доступа: [https://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN4248.pdf](https://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf). Дата обращения: 23.05.2018.

122. Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sensormag.com/components/compensating-for-tilt-hard-iron-and-soft-iron-effects>. Дата обращения: 23.05.2018.

123. Datasheet. ADIS16265 – Programmable Digital Gyroscope Sensor – Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADIS16260\\_16265.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADIS16260_16265.pdf). Дата обращения: 23.05.2018.

124. Datasheet. SCA3100-D04 – 3-axis high performance accelerometer with digital SPI interface for applications demanding high stability with tough environmental requirements – Murata [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/sensor/accel/sca3100/sca3100-d04\\_accelerometer\\_datasheet\\_82\\_688\\_00\\_e\\_0.ashx](https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/sensor/accel/sca3100/sca3100-d04_accelerometer_datasheet_82_688_00_e_0.ashx). Дата обращения: 23.05.2018.

125. Datasheet. SCC2230-E02 – Combined gyroscope and 3-axis accelerometer with digital SPI interface for applications demanding high stability with tough environmental requirements – Murata [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/sensor/gyro/scc2000/scc2230-e02%20datasheet%2082188800b0.ashx?la=en>. Дата обращения: 23.05.2018.

126. Datasheet. AIS328DQ – High-performance ultra-low-power 3-axis accelerometer with digital output for automotive applications – STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ais328dq.pdf>. Дата обращения: 23.05.2018.

127. Datasheet. A3G4250D – 3-axis digital gyroscope for automotive telematics, navigation applications, AEC-Q100 qualified – STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/a3g4250d.pdf>. Дата обращения: 23.05.2018.

128. Карьерные экскаваторы: Справочник рабочего / В.Н. Ефимов [и др.]. – М.: Недра, –1994. – 381 с.:ил. ISBN 5-247-02401-X.

129. Дроздова, Л.Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. пособие / Л.Г. Дроздова, О.А. Курбатова. – Владивосток: Из-во ДВГТУ, 2007. –235 с.

130. Бочаров, Р.А. Кинематические и силовые параметры системы «ковш-упряжь» выемочно-погрузочного драглайна./ Р.А. Бочаров, В.Ф. Сандалов // Материалы Междунар. науч.-тех. конф. «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития». Навои (Республика Узбекистан), – 2010, С-168-169.

131. Экскаваторы для открытых горных работ. Каталог – справочник. М.:«НИИИНФОРМТЯЖМАШ», – 1972. –159 с.

132. Экскаваторы карьерные гусеничные типа ЭКГ–10, ЭКГ–8ус и ЭКГ – 5у. Руководство по эксплуатации 3536.00.00.000РЭ.

133. Экскаваторы для открытых горных работ. Отраслевой каталог 18-4-1983 / П.В. Желобанов [и др.]. – М.: «ЦНИИТЭИтяжмаш», – 1983. –130 с. : ил.

134. Справочник механика открытых работ. Экскавационно-транспортные машины циклического действия / М.И. Щадов [и др.]; под ред. М.И. Щадова, Р.Ю. Подерни. – М.: Недра, 1989. – 374 с.: ил.

135. Подерни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых горных работ: Учебное пособие. В 2 т. Т.1. – 4-е изд., стер./ Р.Ю. Подерни – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 422 с.

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

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

138. 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.

139. 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.

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

141. Мещеряков, Я. Е, Система автоматизированного учета рабочих циклов платформ экскаваторов на угледобывающих предприятиях Кузбасса / Я. Е. Мещеряков, А. М. Корилов // Научная сессия ТУСУР–2015: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск: Издательство «В–Спектр», 2015.– Ч. 3. – С. 169-172.

142. 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.

143. 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.

144. Mescheryakov, Y. Automated system of monitoring and positioning of functional units of mining technological machines for coal-mining enterprises / Y. Mescheryakov, R. Mescheryakov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Volume 161. P 5. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20181610301>

145. Бутаков В., Фаградянц И. Политехнический терминологический толковый словарь //М.: ЭТС (Электронные и традиционные словари). – 2014.

146. Худяков, Г. И. Развитие методов аналитической геометрии на сфере для решения задач геодезии и навигации / Г.И. Худяков // Записки Горного института. – 2017. – № 223. – С.70–81.

147. Martin Vermeer. Mathematical Geodesy / Vermeer.M. – .: Publishing house of the Finnish Geodetic Institute, Helsinki, 2015. 119 p.

148. Кранц П. Сферическая тригонометрия: Пер. с нем. / Под ред. Я.Н. Шпильрейна. Изд. 2–е. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 96 с.

149. Хруль, С.А. Адаптивный алгоритм обработки потока навигационных данных на основе метода диагностической фильтрации / С.А. Хруль, Д.М. Сонькин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 5. – С. 212–222.

150. Parameters and calibration of a low-g 3-axis accelerometer (Application Note 4508) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/a0/f0/a0/62/3b/69/47/66/DM00119044.pdf/files/DM00119044.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119044.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/a0/f0/a0/62/3b/69/47/66/DM00119044.pdf/files/DM00119044.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119044.pdf). Дата обращения: 23.05.2018.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

### Кириллица

- АСМП – автоматизированная система мониторинга и позиционирования;
- БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;
- БРУ – бортовое регистрирующее устройство;
- ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;
- ГТМ – горная технологическая машина;
- ИИМ – инерциальный измерительный модуль;
- ИМС – интегральная микросхема;
- МА – микроэлектромеханический акселерометр;
- МГ – микроэлектромеханический гироскоп;
- МК – микроконтроллер;
- МЭМС – микроэлектромеханические системы;
- ПВВОН – порты ввода–вывода общего назначения;
- ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;
- СИД – светоизлучающий светодиод;
- СУ – система управления;
- ТПЭ – технологический процесс экскавации;
- УП – управляющая программа;
- ЦОС – цифровая обработка сигналов;
- ЭКГ – электрический карьерный гусеничный экскаватор (мехлопата);
- ЭШ – экскаватор шагающий (драглайн);

### Латиница

- AHRS – (*англ.* Attitude and Heading Reference System – система определения пространственного положения);
- CEP – (*англ.* circular error probable) – вероятная круговая ошибка;
- CTS – (*англ.* Clear to Send) линия готовности оборудования к передаче;
- GSM – (*англ.* Global System for Mobile Communications);
- ИС – (*англ.* Inter-Integrated Circuit) последовательная асимметричная шина;
- IP – (*англ.* Internet Protocol) межсетевой протокол;
- MARG – (*англ.* Magnetic, Angular Rate, and Gravity – магнитная, угловая скорость и гравитация);
- PSD – (*англ.* Power Spectral Density) – спектральная плотность мощности;
- RS–232 – стандарт последовательного физического уровня для асинхронного интерфейса USART;
- RS–485 – стандарт дифференциального физического уровня для асинхронного интерфейса USART;
- RTS – (*англ.* Request to Send) линия запроса на передачу данных;
- RX – (*англ.* Receive Data) линия приема данных;
- SPI – (*англ.* Serial Peripheral Interface) последовательный периферийный интерфейс;
- TX – (*англ.* Transmit Data) линия передачи данных;
- USART – (*англ.* Universal Asynchronous Receiver-Transmitter ) универсальный последовательный синхронно–асинхронный приемопередатчик;
- WDT – (*англ.* watchdog timer ) сторожевой таймер.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### АКТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Утверждаю:

Заместитель технического директора  
по горным работам разреза «Кедров-  
ский»

\_\_\_\_\_ Д. И. Никонов  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.



#### АКТ

промышленных испытаний аппаратно-программного комплекса позиционирования функциональных элементов горных машин, разработанного в Кузбасском государственном техническом университете имени Т. Ф. Горбачёва (КузГТУ) и Томским университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), проведенных при перевалке горной массы экскаватором ЭШ-10/50 на разрезе «Кедровский»

Комиссия в составе:

- |                 |  |
|-----------------|--|
| Морозов А. М.   | главный технолог разреза «Кедровский»;   |
| Курышкин Н. П.  | кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем КузГТУ;                                    |
| Мещеряков Я. Е. | ассистент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем КузГТУ, аспирант каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа; |

установила следующее:

1. Аппаратно-программный комплекс позиционирования функциональных элементов горных машин (далее АПК), состоящий из телеметрического блока датчиков с системой управления на основе пользовательской реконфигурируемой ячейки MyRio и ноутбука был установлен на горизонтально закрепленном столе в кабине машиниста экскаватора ЭШ10/50 и подключен к бортовой сети переменного тока 220 В, 50 Гц.
2. Телеметрический блок был установлен на горизонтальном столе находящимся позади машиниста на расстоянии 9.5 метров от оси вращения экскаватора под углами 43° к чувствительной оси Х (продольная ось) и 47° к чувствительной оси Y (поперечная ось).
3. Перед запуском АПК с помощью профессионального электронного уровня «Ермак 659-034» ( $\Delta=0,05^\circ$ ) была выполнена юстировка комплекса, которая заключалась в следующем: полученные с помощью электронного уровня два угла  $0,05^\circ$  и  $0,1^\circ$  по крену (ось Х) и тангажу (ось Y), соответственно, были введены в программу системы управления в качестве поправок.
4. Произведена калибровка показаний датчика угловой скорости. Произведена выборка показаний гироскопа продолжительностью 150 секунд в со-

стоянии покоя для расчета последующей калибровки. После калибровки собственный уровень шума составил  $0.035^\circ$  /секунду.

5. Время непрерывной работы комплекса составило 127,5 минут.
6. Вся информация об угловом положении телеметрического блока вокруг трех осей X, Y и Z записывалась на съемный FLASH-носитель.
7. Одновременно с записью данных, отображалась информация с помощью графического интерфейса об: угловой скорости, углом, линейном ускорении, угловой ориентации платформы экскаватора, времени работы, а так же скорректированной угловой скорости.
8. Визуальное наблюдение угловой ориентации платформы экскаватора совпадало с информацией отображаемой графическим интерфейсом.
9. АПК в течение всего периода работал стабильно. Перманентная ошибка угловой ориентации после корректировки ( $0,5^\circ$ /минута) наблюдаемая по графическому интерфейсу относительно необработанных показаний гироскопа и акселерометра ( $0,85^\circ$  /минута) по оси рысканья.
10. Использование алгоритма обработки данных, разработанного Мещеряковым Я. Е., позволило значительно нивелировать уровень дрейфа гироскопа и тем самым повысить точность определения рабочих циклов.
11. Разработанный Мещеряковым Я. Е. графический алгоритм позволил визуализировать угловые перемещения экскаватора посредством трехмерной графики.

Комиссия рекомендует использовать разработанный в КузГТУ и ТУСУРе аппаратно-программный комплекс на шагающих экскаваторах угольных разрезов Кузбасса для постоянного мониторинга горизонтальности платформы и учёта рабочих циклов горной технологической машины за фиксированный промежуток времени и информирования машиниста о критических режимах работы экскаватора.

	А. М. Морозов
	Н. П. Курьшкин
	Я. Е. Мещеряков

15 сентября 2017 года.

Утверждаю:

Заместитель директора–  
технический директор филиала  
«Кедровский угольный разрез»

Я. О. Литвин

\_\_\_\_\_ 2018 г.



АКТ

промышленных испытаний аппаратно-программного комплекса позиционирования функциональных элементов горных машин, разработанного в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), проведенных при перевалке горной массы экскаватором ЭШ-10/50 на филиале «Кедровский угольный разрез» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь».

Комиссия в составе:

- Ненашев С.В.      главный механик филиала «Кедровский угольный разрез»;
- Черкашин К.А.    старший механик филиала «Кедровский угольный разрез»;
- Мещеряков Я.Е.    аспирант кафедры АСУ ТУСУР;

установила следующее:

1. Автоматизированная система мониторинга и позиционирования функциональных узлов горных технологических машин (далее АСМП), состоящий из телеметрического блока датчиков ADIS16265, SCC2230, SCA3300 с системой управления на основе пользовательской реконфигурируемой ячейки MyRio и ноутбука была установлена на горизонтально закрепленном столе в кабине машиниста экскаватора ЭШ10/50 и подключена к бортовой сети переменного тока 220 В, 50 Гц;
2. Телеметрический блок был установлен на горизонтальном столе находящимся у боковой стенки кабины позади машиниста на расстоянии 9.3 метра от оси вращения экскаватора под углами 48° к чувствительной оси X (продольная ось) и 42° к чувствительной оси Y (поперечная ось);
3. Перед запуском АСМП с помощью профессионального электронного уровня «Ермак 659-034» ( $\Delta=0,05^{\circ}$ ) была выполнена юстировка комплекса, которая заключалась в следующем: полученные с помощью электронного уровня два угла  $0,05^{\circ}$  и  $0,1^{\circ}$  по крену (ось X) и тангажу (ось Y), соответственно, были введены в программу системы управления в качестве поправок;
4. Произведена калибровка показаний датчика угловой скорости. Произведена выборка показаний гироскопа продолжительностью 200 секунд в состоянии покоя для расчета последующей калибровки. После калибровки

- собственный уровень шума гироскопа ADIS16265 составил  $0.12^\circ$  /секунду, уровень шума гироскопа SCC2230 составил  $0.43^\circ$  /секунду;
5. Во время проведения калибровки гироскопов был запущен модуль спутниковой навигации (ГНСС) для запуска алгоритма коррекции;
  6. Время непрерывной работы комплекса составило 245,5 минут;
  7. Вся информация об угловом положении телеметрического блока вокруг трех осей X, Y и Z, а также пространственные координаты записывалась на съемный FLASH-носитель;
  8. Одновременно с записью данных, отображалась информация с помощью графического интерфейса об: угловой скорости, угловом линейном ускорении, угловой ориентации платформы экскаватора, времени работы, а так же скорректированной угловой ориентации;
  9. Визуальное наблюдение угловой ориентации платформы экскаватора совпадало с информацией отображаемой графическим интерфейсом;
  10. АСМП в течение всего периода работал стабильно. Абсолютная точность угловой ориентации по истечению 60 минут с функционирующим алгоритмом коррекции посредством ГНСС составила не хуже  $5^\circ$  для гироскопа ADIS16265 и  $9^\circ$  для гироскопа SCC2230 наблюдаемая по графическому интерфейсу по оси рысканья;
  11. Точность идентификации рабочих циклов составила 92 % при использовании гироскопа ADIS16265 и 86 % при использовании гироскопа SCC2230;
  12. Использование нового алгоритма коррекции угловой ориентации посредством ГНСС позволило обеспечить высокую точность и стабильность угловой ориентации в любой абсолютный момент времени.

Комиссия рекомендует:

1. Использовать разработанный в ТУСУРе аппаратно-программный комплекс на шагающих экскаваторах угольных разрезов Кузбасса с целью постоянного мониторинга горизонтальности платформы и учёта рабочих циклов технологической машины за фиксированный промежуток времени;
2. В качестве аппаратного обеспечения рекомендовать использование гироскопа ADIS16265 и акселерометров SCA3300 или SCA3100;
3. Начать выпуск установочной серии АСМП.

20 марта 2018 года.

	С.В. Ненашев
	К.А. Черкашин
	Я. Е. Мещеряков

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2014617216**

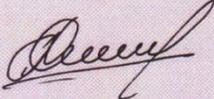
**Автоматизированная система наблюдения за положением  
рабочих элементов горных машин**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ) (RU)*

Авторы: *Мещеряков Ярослав Евгеньевич (RU), Обоянский Павел Михайлович (RU), Курышкин Николай Петрович (RU), Любимов Олег Владиславович (RU)*

Заявка № **2014614919**  
Дата поступления **26 мая 2014 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **15 июля 2014 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

  
 **Б.П. Симонов**

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

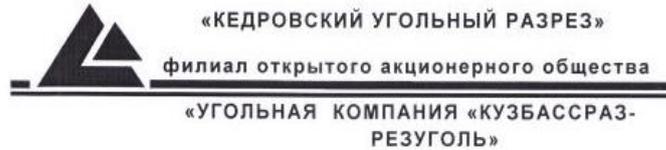
**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА РАЗРАБОТКУ И ВНЕДРЕНИЕ**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА И**

**ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

**(ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ, ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ)**



№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Утверждаю:

Заместитель директора  
технический директор филиала  
«Кедровский угольный разрез»

Я. О. Литвин

2016 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**

на разработку и внедрение  
системы автоматизации процессов мониторинга и позиционирования функциональных  
узлов технологических машин

**Сроки выполнения услуг:** I квартал 2016 года – IV квартал 2018 года ;

**Объект мониторинга:** шагающие экскаваторы серий ЭШ 10/50, ЭШ 10/70 и ЭКГ-5, ЭКГ-15 и им подобные;

**Финансирование:** «УК «Кузбассразрезуголь»;

**Заказчик:** «УК «Кузбассразрезуголь»;

**Разработчик:** Аспирант кафедры АСУ Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) – Мещеряков Ярослав Евгеньевич;

**Объем технического задания:** 37 страниц.

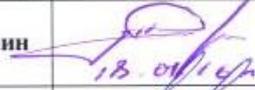
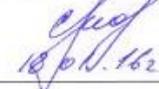
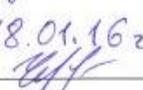
## Лист согласования

ТЗ на разработку регламентов системы для автоматизации процессов мониторинга и позиционирования функциональных узлов технологических машин, работающих на Кедровском угольном разрезе

## СОСТАВИЛ

Наименование организации	Должность	Фамилия, имя, отчество	Подпись / Дата
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»	Аспирант кафедры АСУ ТУСУР	Я.Е. Мещеряков	 18.01.16

## СОГЛАСОВАНО

Наименование организации	Должность	Фамилия, имя, отчество	Подпись / Дата
«Кедровский угольный разрез» филиал открытого акционерного общества «Угольная компания «Кузбассразрезуголь»	Заместитель директора по общим вопросам	М.Л. Неволин	 18.01.16
	Главный механик	С.В. Ненашев	 18.01.16
	Старший механик	К.А. Черкашин	18.01.16 

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНЫХ МАШИН

 «КЕДРОВСКИЙ УГОЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ»  
филиал открытого акционерного общества  
«УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ»

Советская ул., 5, р.п. Кедровка, г. Кемерово, Россия, 650903  
Тел. (3842) 69-23-11 факс (3842) 69-20-91 E-mail office@kdr.kru.ru  
ОКПО 57633914 ОГРН 1034205040935 ИНН/КПП 4205049090/424950001



№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Утверждаю:

Заместитель директора –  
технический директор филиала  
«Кедровский угольный разрез»  
Я. О. Литвин  
2016 г.



### Обоснование целесообразности использования автоматизированной системы мониторинга функциональных элементов горных машин

Основным технологическим оборудованием, определяющим эффективность работы всего разреза, являются экскаваторы. Основу парка экскаваторов разреза «Кедровский» составляют шагающие драглайны серии ЭШ и электрические одноковшовые карьерные гусеничные экскаваторы серии ЭКГ. Стоимость суточного простоя этих технологических машин составляет 44 590,1 и 49 593,3 рублей соответственно. Поэтому увеличение продолжительности межремонтного периода и сокращение времени простоев основных технологических машин напрямую определяет себестоимость экскавации горной массы.

Одной из основных причин сокращения межремонтного периода является некорректная установка (позиционирование) экскаватора в забое. Это приводит к увеличению нагрузок на механизмы поворота, подшипники, опорно-поворотное устройство, а также все высокоскоростные (более 500 об/мин) вращающиеся механизмы, являющиеся составными частями данного оборудования. Исходя из статистических данных, превышение угла наклона поворотной платформы экскаваторов ЭШ и ЭКГ к горизонту на 2 градуса приводит к повышению вибронагрузки агрегатов на 12–15 %.

Объективную и точную информацию по позиционированию в пространстве основных функциональных элементов экскаваторов может дать машинисту разработанная в ТУСУРе на основе акселерометров и гироскопов автоматизированная система мониторинга и позиционирования (АСМП) функциональных элементов горных технологических машин.

Внедрение АСМП позволит регистрировать характеристики рабочих циклов технологического процесса экскавации горной массы и проводить своевременное технологическое обслуживание (ТО), что приведет к увеличению межремонтного эффективного времени технологических машин.

В настоящее время период ТО для шагающих экскаваторов серии ЭШ составляет 30 суток, продолжительность ремонтного простоя – до 5 суток.

Период ТО для электрических одноковшовых карьерных гусеничных экскаваторов серии ЭКГ составляет 30 суток, а продолжительность ремонтного простоя – до 4 суток.

Внедрение АСМП позволит производить расчет более точного ремонтного цикла с учетом режимов функционирования технологических машин, что сокращает время технического обслуживания механизмов поворота и генераторной группы и позволит увеличить межремонтное эффективное время использования технологических машин.

Использование АСМП позволит увеличить наработку мото-часов отдельных элементов и узлов механизмов за счет постоянного мониторинга угловой ориентации платформы экскаватора и проведения динамического анализа режимов работы экскаватора. АСМП информирует машиниста экскаватора о неоптимальном режиме функционирования и дает рекомендации по их устранению.

АСМП позволит сократить время ТО на одни сутки до пяти раз подряд, тем самым обеспечивая суммарную годовую экономию до десяти суток временных фондов для каждой технологической машины.

Суммарный годовой экономический эффект может составить до 445 901,9 рублей на один шагающий экскаватор серии ЭШ и до 495 933 рублей на один электрический экскаватор серии ЭКГ.

Помимо основного экономического и временного эффекта внедрения, АСМП даст возможность оптимизировать дополнительные процессы:

- автоматически фиксировать и передавать на сервер диспетчера по системе сотовой связи GSM информацию о числе рабочих циклов экскаватора, времени его простоя и эффективной работы;
- минимизировать складские запасы комплектующих и запасных частей;
- возможность прогнозирования с учетом корреляционной связи между внешним динамическим эффектом и развитием дефектов в стреле экскаватора;
- выполнять обучение машинистов посредством активного информирования о ходе технологического процесса экскавации горной массы.

Таким образом, разработка АСМП является экономически целесообразной задачей, внедрение которой повысит надёжность работы горной техники и качество выполняемых работ, обеспечит и ресурсосбережение. По предварительной оценке период окупаемости одной единицы АСМП составит примерно один год.

Главный механик

С. В. Ненашев

Старший механик

К. А. Черкашин

Разработчик:

Аспирант кафедры АСУ ТУСУР

Я. Е. Мещеряков

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МГ, ХАРАКТЕРИСТИКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЭМС-ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

#### Основные характеристики МГ

К основным характеристикам МГ относятся следующие параметры:

– полный диапазон чувствительности (full scale range (FS), measurement range), единица измерения –  $^{\circ}/C$ . Параметр характеризует регистрируемый диапазон угловых скоростей гироскопа. Современные МГ имеют настраиваемый динамический диапазон. При превышении угловой скорости динамического диапазона произойдет насыщение гироскопа (сигнал будет ограничен максимальным значением);

– смещение нуля (zero-rate level), единица измерения – напряжение смещения или младший значащий разряд. Параметр характеризует выходное напряжение или младший значащий разряд при отсутствии угловой скорости. В идеальном аналоговом гироскопе параметр не должен зависеть от напряжения питания и окружающей температуры, должен быть равен опорному напряжению гироскопа;

– чувствительность (sensitivity), единица измерения –  $B/^{\circ}$  или  $^{\circ}/LSB$  (значащий разряд). Параметр характеризует цену деления МГ и характеризует приращение сигнала при изменении угловой скорости на  $1^{\circ}$ . Используется для перевода цифрового кода или аналогового сигнала в угловую скорость;

– изменение чувствительности под действием температуры (Sensitivity change vs. Temperature), единица измерения –  $\%/^{\circ}C$ . Характеризует смещение чувствительности в зависимости от окружающей температуры;

– изменение нулевого значения под действием температуры (zero-rate level change vs. temperature), единица измерения –  $^{\circ}/C$ . Параметр характеризует смещение нуля под действием температуры;

- нелинейность (non linearity), единица измерения –  $\%/FS$ . Параметр характеризует максимальную ошибку между входным и выходным сигналом из-за линеаризации;
- полоса пропускания/полоса частот (system bandwidth), единица измерения – Гц. Параметр характеризует максимальную частоту изменения угловой скорости, регистрируемую МГ;
- стабильность между включениями (Turn-On-to-Turn-On Bias Stability), единица измерения  $^{\circ}/C$ . Параметр характеризует повторяемость датчика между включениями;
- чувствительность к линейному ускорению (Linear acceleration effect), единица измерения  $^{\circ}/сек/g$ . Параметр характеризует отклонение угловой скорости под действием линейного ускорения;
- шумовые характеристики (rate noise density) или случайный дрейф (angular random walk), единица измерения –  $^{\circ}/\sqrt{Гц}$ . Параметр характеризует разрешающую способность на текущей полосе пропускания;
- частота обновления выборок (output data rate), единица измерения – Гц. Частота дискретизации данных.

### Основные характеристики существующих МГ и МА

Таблица Д.1 – Основные характеристики МГ для промышленного применения

Модель датчика	Диапазон измерений [°/сек]	Чувствительность	Полоса частот, [Гц]	Плотность шума	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
A3G4250D	±245	0.00875 [°/сек /значащий разряд]	Прогр.	$0,03 \frac{\%}{\sqrt{\text{Гц}}} \frac{\text{сек}}{\text{сек}}$	-40..85	ST Microelectronics
ADIS16265 Термо компенсированный	±80...±320	0.01832...0.07326 [°/сек /значащий разряд]	50/330	$0,044 \frac{\%}{\sqrt{\text{Гц}}} \frac{\text{сек}}{\text{сек}}$	-40..105	Analog Devices
ADIS16260	±80...±320	0.01832...0.07326 [°/сек /значащий разряд]	50/330	$0,044 \frac{\%}{\sqrt{\text{Гц}}} \frac{\text{сек}}{\text{сек}}$	-40..105	
ADXRS646 аналоговый	±250... ±450	9 мВ / °/сек	1000	$0,01 \frac{\%}{\sqrt{\text{Гц}}} \frac{\text{сек}}{\text{сек}}$	-40..105	
Серия XV-9xxx аналоговый	±100	$0.005 \times U_{\text{пит}} \text{ мВ} / \text{°} / \text{сек}$	52,6	1,0 %/сек	-40..125	Epson Toyocom
Серия XV-8xxx аналоговый	±60	$0.005 \times U_{\text{пит}} \text{ мВ} / \text{°} / \text{сек}$	10	1,0 %/сек	-40..85	Epson Toyocom

Таблица Д.1 – Основные характеристики МГ для промышленного применения (продолжение)

Модель датчика	Диапазон измерений [°/сек]	Чувствительность	Полоса частот, [Гц]	Плотность шума	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
MAX 21001	±31.25... ±2000	0.001...0.067 [°/сек/значащий разряд]	Прогр.	$0,009 \frac{\text{°/сек}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..85	Maxim Integrated
SAR10Z	±100...±250	0.25 [°/сек/значащий разряд]	50	$1,2 \frac{\text{°/сек}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-55..125	Sensoror
CRG20P аналогово-цифровой	±75...±300	0.01537...0.07428 [°/сек/значащий разряд]	40...100	$0,3 \frac{\text{°/сек}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..105	Silicon Sensing Systems
CRS03-01T аналоговый	±100	20 мВ / °/сек	50	0,1 °/сек	-40..85	
CRM100 аналогово-цифровой	±75...±900	0.01...0.125 [°/сек/значащий разряд]	160	$0,018 \frac{\text{°/сек}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..105	

Таблица Д.1 – Основные характеристики МГ для промышленного применения (продолжение)

Модель датчика	Диапазон измерений [°/сек]	Чувствительность	Полоса частот, [Гц]	Плотность шума	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
Серия 803МСУ <sub>х-У</sub>	±150...±9000	–	20...60 60...100 100.300	0,01–0,015 $\frac{\text{°}}{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{сек}}$	–60..85	АО «ГИРООПТИКА»
ММГ–ЭП1	±300	–	100	0.01 $\frac{\text{°}}{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{сек}}$	–40..85	ЦНИИ «Электроприбор»

Таблица Д.2 – Основные характеристики МА для индустриального применения

Модель датчика	Диапазон измерений [G]	Чувствительность	Полоса частот [Гц]	Плотность шума	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
AIS328DQ	$\pm 2G/\pm 4G/\pm 8G$	1020/2040/4080 [ <i>выб</i> /G]	программируемая	$218 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..105	ST Microelectroni cs
SCA3100-D04	$\pm 2G$	900 [ <i>выб</i> /G]	0-55	5 mG RMS	-40..125	Murata
SCA3300	$1.5G/\pm 3G/\pm 6G$	5400/2700/1350 [ <i>выб</i> /G]	0-10 0-88	$37 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..125	
1525J-002	$\pm 2G$	$2000 \frac{mB}{G}$	0-400	$5 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-55..125	Silicon Sensing
2460 и 2466	$\pm 2G \dots \pm 400G$	$2000-10 \frac{mB}{G}$	0-2000	$10-475 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-55..125	
ADXL362	$\pm 2G/\pm 4G/\pm 8G$	1000 [ <i>выб</i> /G]	программируемая	$175 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..85	Analog Devices

Таблица Д.2 – Основные характеристики МА для промышленного применения (продолжение)

Модель датчика	Диапазон измерений [G]	Чувствительность	Полоса частот [Гц]	Плотность шума	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
ADIS16210	±1.7G	16384 [ <i>выб</i> /G]	0-50	$190 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..125	Analog Devices
Серия VS10x	±2G...±200G	1350–13.5 $\frac{мВ}{G}$	0–7000	$7-678 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..85	SAFRAN
AT1105	±0.5G... ±100G	Кратно 25 mV	0-3000	-	-60..85	ТЕМП-АВИА
БА-24	±2G/±4G/ ±8G/±16G/ ±32G/	—	0–100		-55..60	
Серия 803МСУ <sub>х</sub> -Л	±2.5G... ±400G	–	5...120/250/300/1000/2500/1500	$0.1-1 \frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-60..85	АО «ГИРООПТИКА»
Серия А-15/16/17	±10G ±20G ±35	–	–	–	-60..85	ФНПЦ РКПБ

Таблица Д.3 – Основные характеристики интегрированных ИИМ для промышленного применения

Модель инерционного модуля	Диапазон измерений [°/сек]	Чувствительность	Полоса частот [Гц]	Плотность шума [Гц]	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
SCC2230-E02	±125 ±2 G	0.01 [°/сек /значащий разряд] 5886 [выб/G]	10/60 10/60	0,008 $\frac{°}{\sqrt{Гц}}$ 120 $\frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..125	Murata
IAM-20680	±250...±2000 ±2...±16 G	0.00769...0.06 [°/сек /значащий разряд] 16384...2048 [выб/G]	программируемая	0,005 $\frac{°}{\sqrt{Гц}}$ 190 $\frac{\mu G}{\sqrt{Гц}}$	-40..85	InvenSense
DMU02	±300 ±6 G	0.03125 [°/сек /значащий разряд] 120 [выб/G]	>45  >350	< 0.5 $\frac{°}{сек}$ 20 mg	-40..85	Silicon Sensing Systems

Таблица Д.3 – Основные характеристики интегрированных ИИМ для промышленного применения (продолжение)

Модель инерционного модуля	Диапазон измерений [°/сек]	Чувствительность	Полоса частот [Гц]	Плотность шума [Гц]	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
ASM330LXH	±125...±2000 ±2...±16 G	0.00437...0.07 [°/сек /значащий разряд] 16393...2049 [выб/G]	программируемая	0,006 $\frac{°}{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{сек}}$ 80 $\frac{\mu\text{G}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..85	ST Microelectronics
ADIS16362	±75...±300	0.0125...0.05 [°/сек /значащий разряд] 16393...2049 [выб/G]	330  330	0,044 $\frac{°}{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{сек}}$ 0,23 $\frac{\mu\text{G}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..105	Analog Devices
FIS1100CT	±32...±2560 ±2G/±4G /±8 G	1024...2560 16384/8192/4096	программируемая	0,01 $\frac{°}{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{сек}}$ 0,05 $\frac{\mu\text{G}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..85	FAIRCHILD (ON Semiconductors)

Таблица Д.3 – Основные характеристики интегрированных ИИМ для промышленного применения (продолжение)

Модель инерционного модуля	Диапазон измерений [°/сек]	Чувствительность	Полоса частот [Гц]	Плотность шума [Гц]	Рабочий температурный диапазон	Фирма изготовитель
BNO 055	±125...±200 ±2G/±4G /±8 G/±16 G	16 отсчетов на °/сек 1000 [выб/Г]	программируемая	$0,014 \frac{\text{°}}{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{сек}}$ $150 \frac{\mu\text{G}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	-40..85	BOSH

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е**  
**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И**  
**ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ КОМПЛЕКСИРУЮЩЕГО**  
**ФИЛЬТРА МАДЖВИКА**

Программное управляющее обеспечение системы создано в среде LabView 2017, обработка данных частично выполнена в программной среде MATLAB R2017b, аппаратное обеспечение – пользовательская реконфигурируемая ячейка myRIO, разработанные основные модули АСМП. Также необходимо соответствующее программное и алгоритмическое обеспечение для компьютерной симуляции комплексирующего фильтра Маджвика: программа функционирования и программа обновления данных комплексирующего фильтра Маджвика, программа вычисления поворота кватерниона, преобразования кватерниона в ортогональную матрицу, преобразования кватерниона в углы Эйлера – Крылова.

Функционирование системы осуществляется на основе данных из следующих источников:

- ИИМ на основе комбинированного МА и МГ SCC2230;
- ИИМ на основе МГ ADIS16265 и МА SCA3100/SCA3300;
- часов реального времени DS3231;
- приемника ГНСС функционирующего по текстовому протоколу NMEA 0183.

**Основное программное обеспечения автоматизированной системы сбора и**  
**обработки данных**

Основное программное обеспечение используется для организации взаимодействия между автоматизированной системой сбора и обработки данных, с аппаратным обеспечением разрабатываемой АСМП.

Поскольку МЭМС-датчики функционирует по интерфейсу связи SPI, необходимо разработать универсальный драйвер или использовать высокоуровневую реализацию драйвера интерфейса SPI функционирующего в режиме мастера для ПЛИС.

Функционирование блока ГНСС сводится к функционированию по протоколу RS-232 или RS-485 к стандарту UART, поэтому необходимо разработать универсальный драйвер UART или использовать высокоуровневую реализацию драйвера интерфейса для ПЛИС.

Для взаимодействия с аппаратным обеспечением АСМП необходимо разработать программное обеспечение для каждого источника данных:

#### *ИИМ на основе МА и МГ SCC2230*

Программное обеспечение для взаимодействия с датчиком SCC2230:

- унифицированный драйвер для функционирования интерфейса SPI в режиме ведущего устройства (мастера);
- парсер команд и состояний;
- программа пересчета цифрового кода в значение угловой скорости;
- программа пересчета цифрового кода в значения ускорений;
- программа пересчета цифрового кода в значение температуры;
- подпрограмма расчета избыточной контрольной суммы по алгоритму CRC-8 с полиномом 0x1D.

Система сбора и обработки данных с ИИМ SCC2230 представлена на рис.

Е.1.

#### *ИИМ на основе МГ ADIS16265 и МА SCA3100*

Программное обеспечение для взаимодействия с датчиками ADIS16265 и SCA3100:

- унифицированный драйвер для функционирования интерфейса SPI в режиме ведущего устройства (мастера);
- программа циклического сбора данных МГ ADIS16265;
- программа пересчета цифрового кода МГ в угловую скорость;
- программа циклического сбора данных МА;
- программа пересчета цифрового кода МА в ускорения.

Система сбора и обработки данных с ИИМ на основе ADIS16265 и SCA3100 представлена на рис. Е.2.

### *Модуль часов реального времени DS3231*

Программное обеспечение модуля часов реального времени DS3231.

- программа считывания часов реального времени;
- программа настройки системного времени счетно–решающего устройства;
- программа настройки часов реального времени;

### *Модуль приемника ГНСС*

Программное обеспечение приемника ГНСС функционирующего по текстовому протоколу NMEA 0183;

- драйвер для функционирования интерфейса UART в режиме чтения;
- драйвер для функционирования интерфейса UART в режиме записи;
- парсер приемника ГНСС протокола NMEA 0183 для обработки основных команд GPS и ГЛОНАСС (GNRMC, GNGGA, GNGLL, GNGSA, GPGSV, GLGSV, GNVTG);
- программа решения обратной геодезической задачи;
- графический интерфейс;



Рис. Е.1. Система автоматизированного сбора и обработки данных в комплектации с ИИМ SCC2230

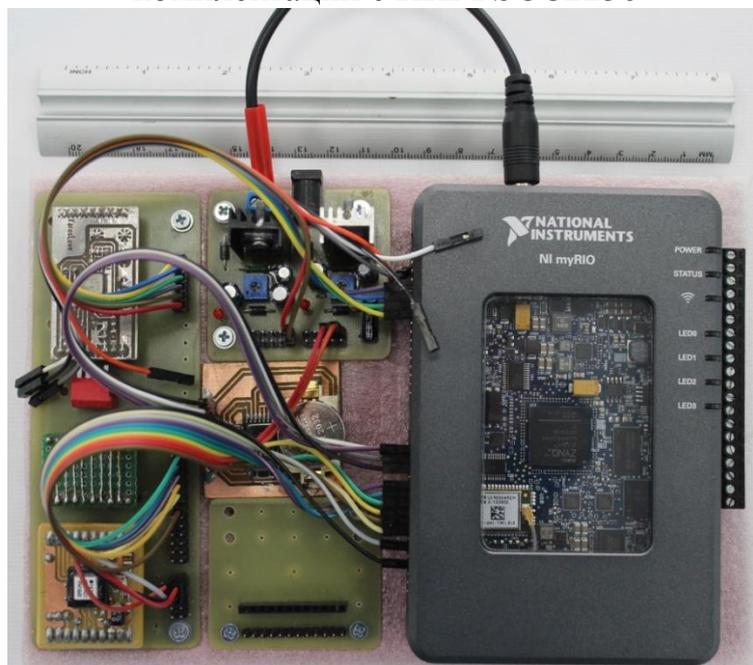


Рис. Е.1. Система автоматизированного сбора и обработки данных в комплектации с МГ – ADIS16265 и МА – SCA3100

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**  
**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе КузГТУ

«1» октября 2018



А.А. Баканов

**Акт**  
**внедрения в учебный процесс**

результатов диссертации Мещерякова Ярослава Евгеньевича  
«Автоматизация процессов мониторинга и позиционирования  
функциональных элементов горных технологических машин»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

председатель – Чичерин И.В (зав. кафедрой ИиАПС, к.т.н.),

члены комиссии

– Курышкин Н.П.(доцент кафедры ИиАПС, к.т.н.),

– Любимов О.В. (доцент кафедры ИиАПС, к.т.н.),

установила, что:

Результаты диссертационного исследования Мещерякова Я.Е., полученные в ходе разработки автоматизированной системы мониторинга и позиционирования функциональных элементов горных технологических машин, внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.04 (Автоматизация технологических процессов и производств) в учебном курсе «Технические средства автоматизации», при проведении практических занятий по темам: «Практическое применение МЭМС датчиков динамических величин», «Цифровая обработка сигналов МЭМС датчиков», «Рабочие режимы МЭМС датчиков и способы определения устойчивости».

Председатель комиссии

/ И.В. Чичерин/

Члены комиссии:

/ Н.П. Курышкин/

/ О.В. Любимов/



Директор по учебной работе ТУСУР

П.Е. Троян

10 октября 2018

### Акт

#### внедрения в учебный процесс

результатов диссертации Мещерякова Ярослава Евгеньевича  
«Автоматизация процессов мониторинга и позиционирования  
функциональных элементов горных технологических машин»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

председатель – Кориков А.М. (зав. кафедрой АСУ, д.т.н.),

члены комиссии

- Мицель А.А. ( профессор кафедры АСУ, д.т.н.),

- Коротина Т.Ю. (доцент кафедры БИС, к.т.н.),

установила, что:

1. Результаты третьей и четвертой глав диссертации используются при проведении практических занятий по дисциплине «Методы планирования эксперимента» для магистрантов направления 09.04.01 Информатика и вычислительная техника (профили: «Программное обеспечение вычислительных машин, систем и компьютерных сетей» и «Автоматизированные системы обработки информации и управления в экономике»).

2. Результаты диссертации используются при выполнении практических занятий и реализации двух проектов ГПО (группового проектного проектирования) на кафедре БИС.

Председатель комиссии

/ А.М. Кориков/

Члены комиссии:

/ Т.Ю. Коротина/

/ А.А. Мицель/