

На правах рукописи



Кабиров Вагиз Александрович

**ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩИЙ КОМПЛЕКС С РЕЗЕРВИРОВАННОЙ
ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность: 2.4.2 – Электротехнические комплексы
и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2023

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте Космических технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель: Семенов Валерий Дмитриевич
кандидат технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Гарганеев Александр Георгиевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск), отделение электроэнергетики и электротехники, профессор;

Краснобаев Юрий Владимирович,
доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск), кафедра «Системы автоматизации, автоматизированное управление и проектирование», профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва).

Защита диссертации состоится «20» декабря 2023 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Постоянно возрастающая конкуренция в ракетно-космической области заставляет искать новые, перспективные решения, позволяющие повысить эксплуатационные качества космических аппаратов и сократить издержки на их производство. Одним из таких решений был переход на использование космических платформ, которые включают в себя все служебные системы. Наиболее важной из служебных систем любой космической платформы является ее система электропитания, которая в среднем занимает 25% массы всего спутника. Центральным узлом системы электропитания является энергопреобразующий комплекс (ЭПК), состоящий из высокочастотных импульсных транзисторных преобразователей электрической энергии и системы автоматического управления, обеспечивающий необходимое преобразование энергии первичных источников для электропитания всех узлов космического аппарата.

Одним из способов снижения издержек на производство ЭПК является унификация модулей, входящих в его состав, таких как модуль управления, модуль выходного фильтра, энергопреобразующие модули зарядного устройства, разрядного устройства, регулятора солнца. При изменении требований к мощности нагрузки изменяется количество энергопреобразующих модулей и тип выходного фильтра. Несмотря на унификацию модулей, сложность и трудоемкость производства и проектирования различных типов модулей остается высокой. Удельные характеристики выпускаемых ЭПК значительно уступают удельным характеристикам импульсных регуляторов напряжения некосмического применения. Кроме того, используемая на настоящий момент структура системы автоматического управления современных ЭПК не позволяет реализовать ЭПК, рассчитанные на два и более отказа. Несмотря на существенный прогресс в области цифровой электроники, управление современных ЭПК остается, по сути, аналоговым. Микроконтроллеры, используемые в ЭПК, выполняют роль общего управления и передачи телеметрии. Использование аналоговых интегральных схем ведет к существенному усложнению производства ЭПК. Кроме того, возрастает количество дискретных элементов и, как следствие, снижаются надежность изделия и его удельные характеристики.

Поэтому тема разработки энергопреобразующих комплексов с резервированной цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания, позволяющих ускорить процесс проектирования и производства ЭПК, снизить издержки производства, повысить технические и удельные характеристики, надежность и степень резервирования, является актуальной.

Степень разработанности

Разработкой, исследованием и производством ЭПК для систем электропитания (СЭП) космических аппаратов занимаются такие предприятия, как Thales Alenia Space (Франция, Италия), EADS Astrium (Франция, Италия), Boeing (США), Space Systems/Loral (США), Lockheed Martin Space Systems (США), China Aerospace Science and Technology Corporation (Китай), Mitsubishi Electric (Япония), ОАО ИСС им. Решетнева, АО «НЦП «Полус». Решению задач снижения массы и габаритов, повышения энергоэффективности, быстродействия, надежности и живучести, а

также уменьшению сроков разработки ЭПК и издержек при их производстве посвящено большое количество работ зарубежных и отечественных ученых. Среди них следует отметить вклад А.И. Чернышева, Б.П. Соустина, В.И. Иванчуры, Ю.А. Шинякова, Ю.М. Казанцева, К.Г. Гордеева, А.Б. Токарева, В.С. Кудряшова, D. O'Sullivan, A. Capel, A. Weinberg, D. Zhang и др.

При этом остаются нерешенными проблемы и задачи, которые обеспечат ускорение процесса проектирования и производства ЭПК, приведут к снижению издержек при производстве, позволят увеличить их удельные характеристики и надежность.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование энергопреобразующего комплекса с цифровой резервированной системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов, позволяющая повысить технические характеристики и ускорить процесс проектирования и производства ЭПК для космических платформ с различной мощностью полезной нагрузки.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Предложить структурную схему системы автоматического регулирования энергопреобразующего комплекса с резервированной цифровой системой управления, позволяющую повысить тактико-технические характеристики, ускорить процесс производства и наращивать выходную мощность и глубину резервирования как силовой части, так и системы управления.

2. Детально описать и проверить на имитационной модели алгоритмы функционирования энергопреобразующего комплекса и проработать аппаратно-программную реализацию цифровой системы управления.

3. Разработать рекомендации по выбору минимальной емкости выходного фильтра для обеспечения требуемого выходного импеданса энергопреобразующего комплекса при заданной частоте работы силовых преобразователей и параметрах первичных источников питания.

4. Разработать быстродействующий цифровой широтно-импульсный модулятор, позволяющий уменьшить инерционность в контурах регулирования, для обеспечения высоких динамических показателей выходного напряжения и удельных показателей энергопреобразующего комплекса в целом.

5. Разработать быстродействующий цифровой многоканальный элемент выбора медианного сигнала, позволяющий создать систему управления ЭПК, рассчитанную на два и более отказа.

6. Разработать полную имитационную модель энергопреобразующего комплекса с цифровой системой управления, реализующую заданный алгоритм управления устройствами ЭПК во всех режимах работы.

7. Практически реализовать и проверить функциональную работоспособность основных узлов энергопреобразующего комплекса с цифровым управлением.

Объектом исследования является энергопреобразующий комплекс с импульсными транзисторными преобразователями и резервированной цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов.

Предметом исследования являются структура ЭПК, алгоритмы управления, возможности резервирования, статические и динамические характеристики.

Научная новизна полученных результатов

1. Предложена структурная схема системы автоматического регулирования энергопреобразующего комплекса, отличающаяся тем, что для каждого канала преобразования энергии реализован независимый контур обратной связи по выходному напряжению, а единый сигнал управления для подчиненного контура регулирования каждого канала выбирается многоканальными элементами выбора медианного сигнала, что позволяет создавать ЭПК из автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения и ступенчато наращивать его выходную мощность параллельным включением модулей, обеспечивая многократное резервирование функциональных узлов ЭПК.

2. Установлена количественная связь величины емкости выходного фильтра с частотой работы импульсного преобразователя, его выходным импедансом и запасом по фазе контура обратной связи по напряжению.

3. Предложен цифровой ШИМ, в котором реализовано асинхронное изменение содержимого регистра сравнения, с частотой, превышающей частоту работы модулятора, что позволяет кратно снизить максимальное время чистого запаздывания, вносимое в контур регулирования, и повысить быстродействие цифровой системы управления.

Практическая значимость диссертационной работы

1. Предложенная структурная схема системы автоматического регулирования энергопреобразующего комплекса может быть применена не только в системах электропитания космических аппаратов, но и при проектировании других энергопреобразующих установок со статическими преобразователями энергии, имеющими модульную структуру.

2. Разработанный быстродействующий цифровой широтно-импульсный модулятор позволяет исключить фазовые задержки, связанные с алгоритмом работы ШИМ первого рода, применяемого на текущий момент в современных цифровых системах управления импульсными преобразователями, и обеспечить быстродействие контуров обратных связей, близкое к быстродействию систем управления с аналоговыми ШИМ-контроллерами.

3. Разработанный многоканальный элемент выбора медианного сигнала при реализации в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) позволяет безынерционно, с минимальной задержкой в один такт опорного генератора (например, 5 нс) производить выбор сигнала по медианному алгоритму и реализовать на его основе ЭПК, рассчитанный на два и более отказа.

4. Разработанный быстродействующий (850 МБод) резервированный цифровой интерфейс связи, позволяющий с временной задержкой 1 мкс производить обмен сигналами управляющего воздействия и служебными данными между 25 параллельно работающими модулями стабилизации напряжения ЭПК.

5. Разработан, изготовлен и испытан опытный образец высоковольтного энергопреобразующего комплекса с цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов мощностью 2,5 кВт.

Методы исследования

Для решения поставленных задач были применены элементы теории общей электротехники, силовой электроники, автоматического управления, цифровой обработки сигналов, методы схемотехнического моделирования с использованием пакетов имитационного моделирования LTSpice и MATLAB Simulink, а также физическое макетирование.

Положения, выносимые на защиту

1. Структурная схема системы автоматического регулирования резервированного энергопреобразующего комплекса модульного типа, отличающаяся тем, что она позволяет выполнять ЭПК на основе автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения, ступенчато увеличивать установленную мощность изменением количества автономных модулей в ЭПК и обеспечивать глубину резервирования на два и более отказа.

2. Цифровая система управления резервированного ЭПК, отличающаяся тем, что канал обратной связи, вырабатывающий сигнал управляющего воздействия, реализован в каждом унифицированном модуле ЭПК, при этом расчет сигнала управляющего воздействия и изменение длительности импульса ШИМ производится с частотой, в 10 и более раз превышающей частоту работы импульсных преобразователей, что позволяет приблизить быстродействие цифровых контуров обратных связей по току и напряжению к быстродействию таких контуров в аналоговых системах управления.

3. Многоканальный элемент выбора медианного сигнала, отличающийся алгоритмом сортировки элементов вектора входных сигналов, дает возможность производить операцию поиска медианного значения параллельно с быстродействием в один период тактового сигнала и пониженными требованиями к аппаратным ресурсам ПЛИС, что позволяет реализовать резервированные ЭПК на основе автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения.

4. Полная имитационная модель ЭПК, отличающаяся реализацией импульсных преобразователей в виде непрерывных нелинейных моделей, что способствует повышению быстродействия имитационного моделирования более чем в 100 раз при исследовании статических и динамических характеристик ЭПК в различных режимах работы, включая переходы из одного режима в другой, при различных сочетаниях токов и напряжений источников питания, буферных накопителей и нагрузки без потери точности результатов моделирования в ограниченном частотном диапазоне.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью расчетных выражений, сходимостью результатов вычислительных, имитационных и натуральных экспериментов, полученных в ходе исследований энергопреобразующего комплекса.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» при выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства «Разработка бортового энергопреобразующего комплекса с цифровым резервированным управлением для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с применением российской импортозамещающей

электронной компонентной базы» (договор № 02.G25.31.0182 от 01.12.2015 г. между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ, а также внедрены в учебном процессе кафедры «Промышленная электроника» ТУСУРа. Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие соответствующих актов о внедрении.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на пяти всероссийских и международных научно-технических конференциях:

1. XVII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2021);
2. The 2ND international scientific and practical conference on innovations in engineering and technology (Великий Новгород, 2019);
3. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019» (Томск, 2019);
4. XIV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018» (Новосибирск, 2018);
5. XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2018).

Публикации

По основным научным результатам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных высшей аттестационной комиссией РФ, 6 статей в изданиях, входящих в международные реферативные базы и системы цитирования Scopus/WebOfScience, 17 – в сборниках материалов всероссийских и международных конференций, получены два патента РФ на полезную модель.

Личный вклад автора

Материалы диссертации являются обобщением работ автора, выполненных с 2006-го по 2022-й год, и отражают его личный вклад в решаемые задачи. Постановка задач исследования и обсуждение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем Семеновым В.Д. Все научные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. Опубликованные работы написаны в соавторстве с научным руководителем и другими сотрудниками НИИ космических технологий и кафедры промышленной электроники ТУСУРа. Автором совместно с Отто А.И, Торгаевой Д.С., Винтоняком Н.П., Тюниным С.Г., Бородиным Д.Б., Ахтырским К.А. изготовлен и испытан опытный образец высоковольтного энергопреобразующего комплекса с цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов.

Соответствие паспорту специальности

Исследования, выполненные в диссертационной работе, соответствуют формуле и пунктам 1, 2, 3, 4 паспорта специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем;

2. Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем.

3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления;

4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка 154 используемых источников и 4 приложений. Работа изложена на 209 страницах машинного текста, иллюстрируются 121 рисунком и 27 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор энергопреобразующих комплексов систем электропитания космических аппаратов тяжелых спутниковых платформ, применяемых для создания современных спутников.

Определено, что все современные энергопреобразующие комплексы строятся на основе нескольких унифицированных типов модулей, которые включают в себя каналы преобразования энергии заряда и разряда аккумуляторных батарей, регуляторов солнца, выходного фильтра и модуля управления. При этом система управления ЭПК реализуется на аналоговой элементной базе, а цифровая часть выполняет функцию сбора и передачи телеметрической информации. Структура систем автоматического регулирования современных ЭПК реализуется одинаково по двухконтурной системе регулирования, в которой контур по току является подчиненным, а по напряжению – внешним. При этом внешний контур регулирования разделен на три независимых канала, выходные сигналы которых поступают на один трехканальный элемент выбора медианного сигнала. Резервирование ЭПК производится на уровне каналов преобразования энергии и внешних контуров регулирования напряжения, при этом сам элемент выбора медианного сигнала не резервирован. Такая структура системы автоматического регулирования не позволяет создать ЭПК на основе одного типа унифицированных модулей и потенциально не имеет резерва на отказ элемента выбора медианного сигнала, что снижает ее надежность.

Предложена новая структура САР (рисунок 1), позволяющая создать ЭПК на основе автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения (МСН) с цифровым управлением, которая дает возможность сократить издержки производства, повысить удельные и технические показатели, надежность и глубину резервирования ЭПК на два отказа и более.

Она включает в себя все блоки схемы автоматического регулирования, реализуемых в современных ЭПК, и имеет следующие отличия, а именно: количество каналов обратных связей (КОС) внешнего контура и многоканальных

элементов выбора МЭ кратно количеству каналов преобразования энергии; выходной фильтр ЭПК распределен по каналам преобразования энергии; все каналы КОС объединены единым цифровым интерфейсом связи (ЦИС).

Структурная однотипность ЭПК позволяет реализовать автономный унифицированный модуль стабилизации напряжения, который в свою очередь даст возможность построить ЭПК из одинаковых модулей, их количество будет соответствовать требованиям нагрузки по мощности и необходимому уровню резервирования. Уменьшение количества уникальных унифицированных модулей приведет к повышению скорости проектирования и производства ЭПК для новых КА.

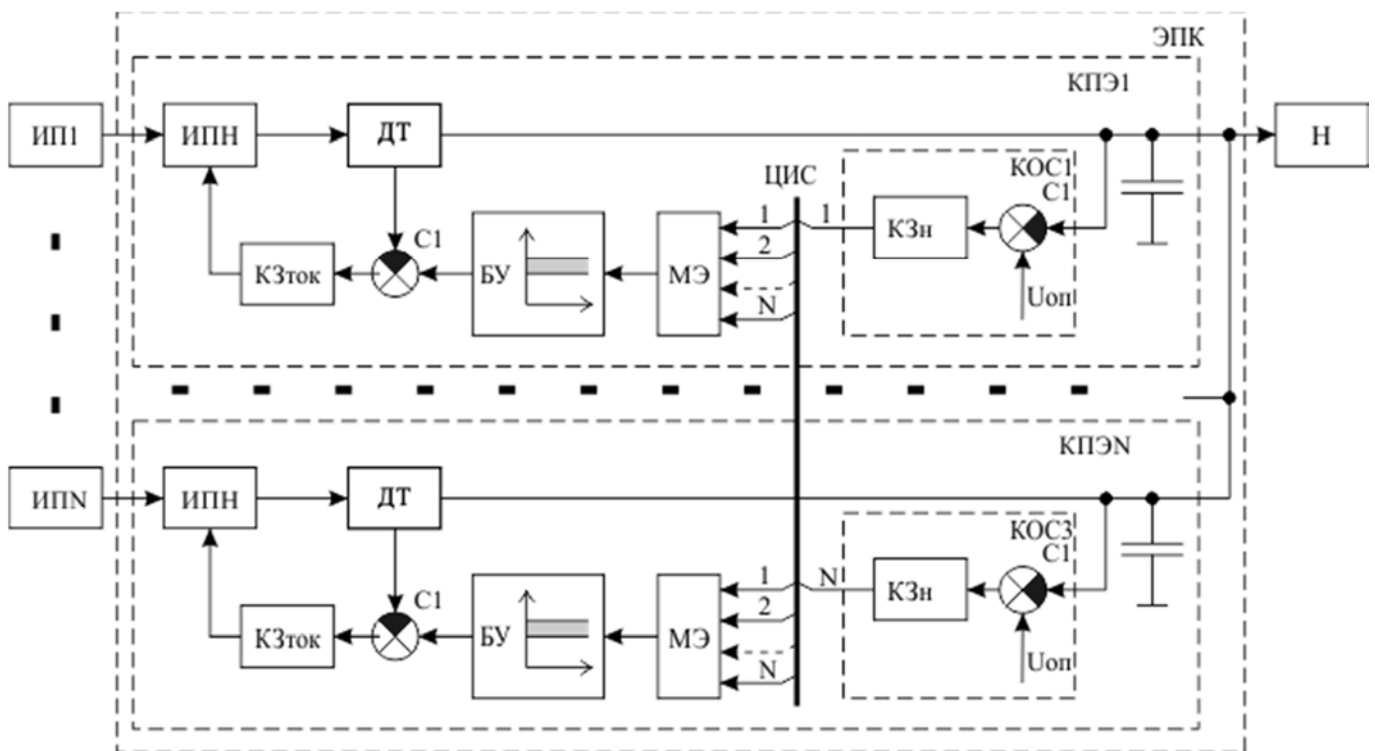


Рисунок 1 – Предлагаемая структура САР ЭПК на унифицированных МЭ с цифровой системой управления

Во второй главе определен перечень функций, выполняемых современными ЭПК, и представлена полная структурная схема энергопреобразующего комплекса на основе автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения (рисунок 2). Схема реализует предлагаемую САР и позволяет выполнять все требуемые функциональные задачи, возложенные на энергопреобразующие комплексы современных систем электропитания. Показано взаимодействие блоков МЭС при выполнении указанных функций.

Приведено выражение для определения минимальной требуемой емкости выходного фильтра энергопреобразующего комплекса, обеспечивающей требуемые значения выходного импеданса при выбранной частоте единичного усиления контура отрицательной обратной связи по напряжению:

$$C \geq \frac{1.2}{2\pi f_1 \sqrt{Z_{out\ max}^2 - r_c^2}} \text{ при } \varphi \geq 60^\circ, \quad (1)$$

где f_1 – частота единичного усиления, определяемая выбранной частотой работы силовых преобразователей; $Z_{out\ max}$ – требуемый максимальный выходной импеданс ЭПК; r_c – внутреннее сопротивление конденсаторов выходного фильтра; φ – запас по фазе на частоте единичного усиления.

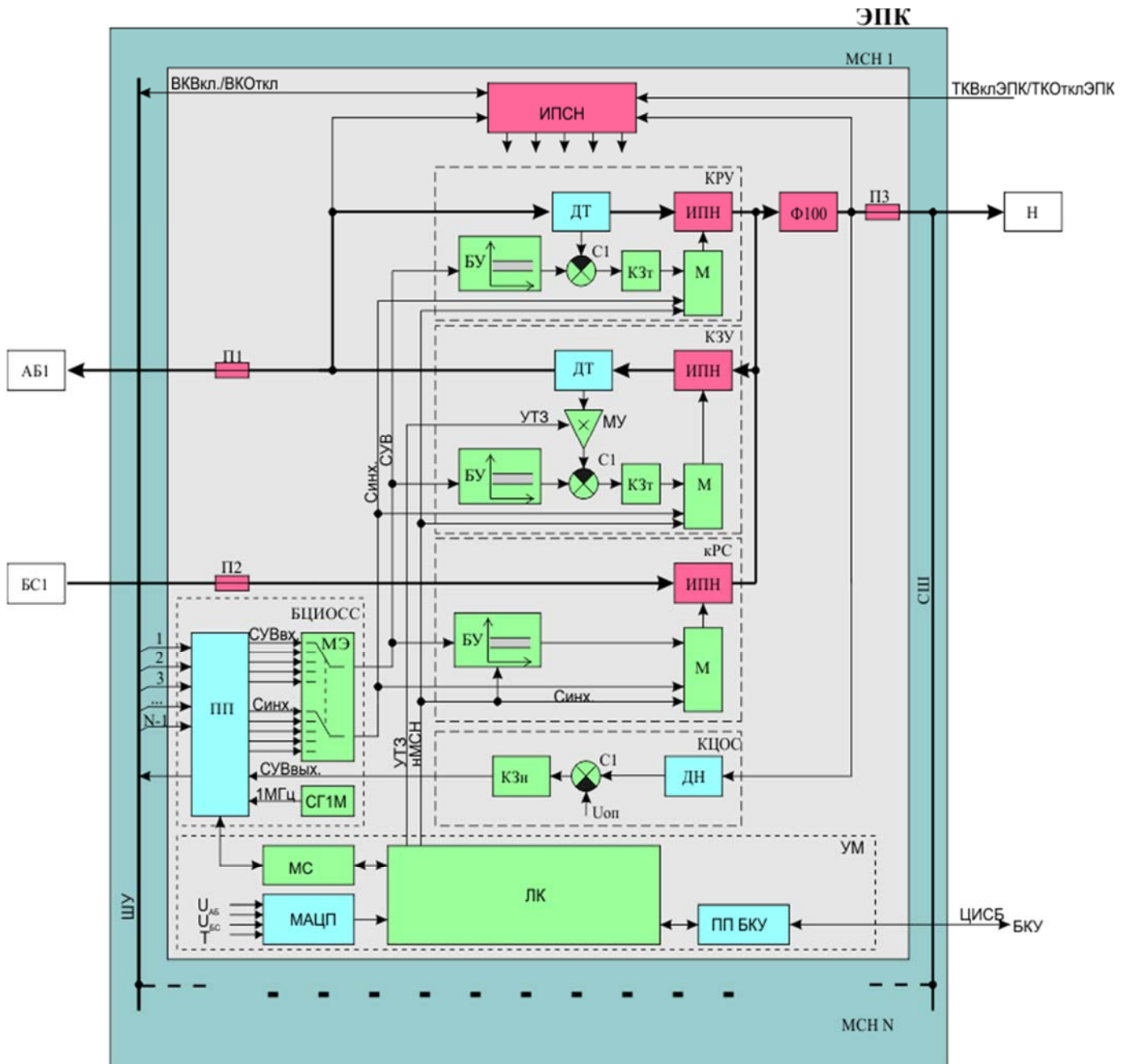


Рисунок 2 – Полная структурная схема ЭПК на автономных унифицированных МСН с цифровой системой управления

Предложен быстродействующий многоканальный элемент выбора медианного сигнала, позволяющий реализовать энергопреобразующий комплекс, рассчитанный на два и более отказа с цифровой системой управления (СУ), реализованной на базе ПЛИС (рисунок 3).

Многоканальный элемент выбора медианного сигнала проверен на имитационной модели и аппаратно, на ПЛИС.

На рисунке 4 представлены результаты работы 7-канального элемента выбора медианного сигнала в случае нулевых значений сигналов на двух входах.

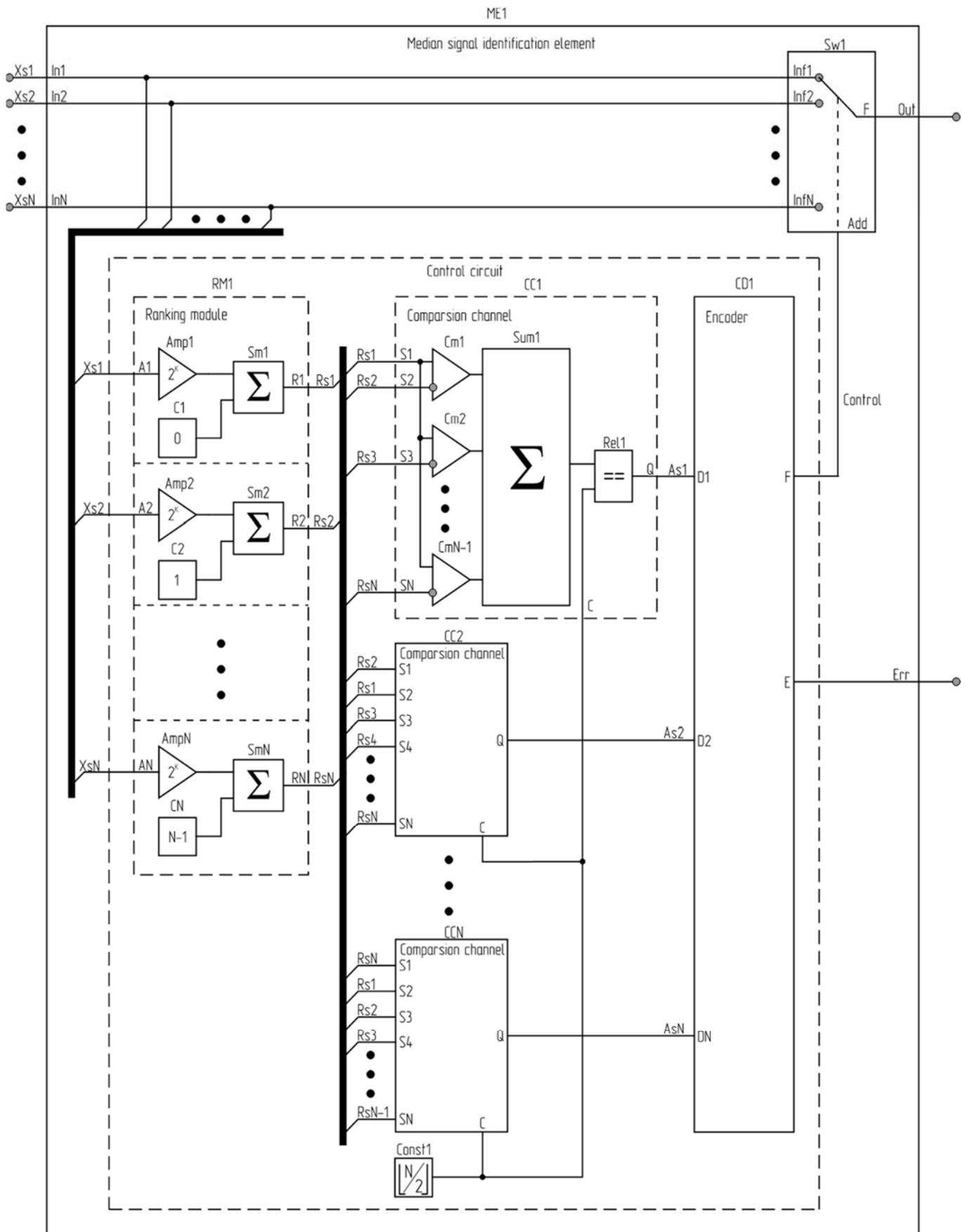


Рисунок 3 – Функциональная схема N -канального элемента выбора медианного сигнала

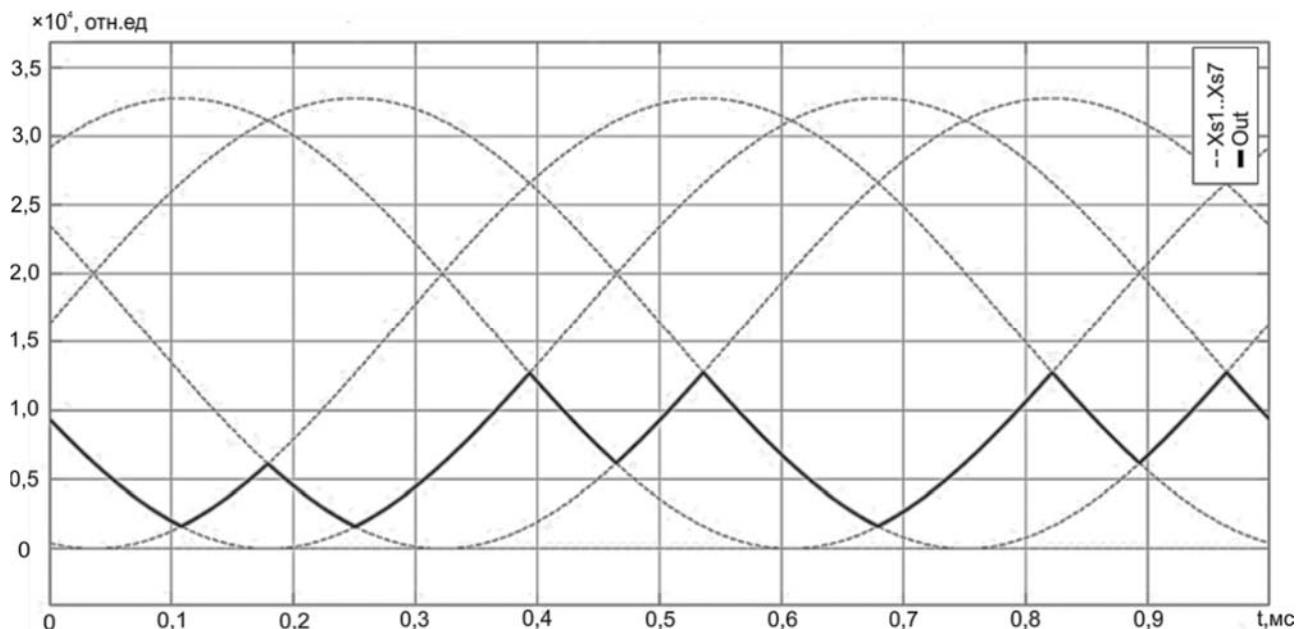


Рисунок 4 – Результаты работы 7-канального элемента выбора медианного сигнала

Показано, что цифровой широтно-импульсный модулятор (ЦШИМ) в САР импульсных регуляторов можно заменить звеном чистого запаздывания с переменным временем запаздывания, зависящим от положения рабочей точки преобразователя с постоянной составляющей b регулятора, и предложен цифровой модулятор, позволяющий снизить максимальное время запаздывания цифровых систем управления, представленный на рисунке 5,а.

На рисунке 5,б приведен алгоритм работы, предложенного цифрового модулятора.

На рисунках 5,в и 5,г показаны фазочастотные характеристики сигнала на выходе цифрового широтно-импульсного модулятора, на вход которого поступает синусоидальный модулирующий сигнал с постоянной составляющей b и малой амплитудой a .

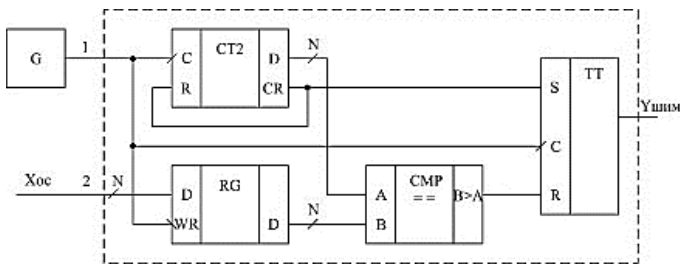
На рисунке 5,в приведены характеристики при кратности квантования модулирующего сигнала один раз за период ЦШИМ, а на рисунке 5,г – при кратности квантования два раза за период ЦШИМ.

Можно видеть, что при уменьшении постоянной составляющей синусоидального сигнала b увеличивается фазовая задержка всего спектра сигнала и асимптотически стремится к фазовой характеристике звена чистого запаздывания с временем запаздывания, равным периоду работы модулятора T_{Π} (рисунок 5,в). При увеличении кратности квантования фазовые задержки кратно уменьшаются.

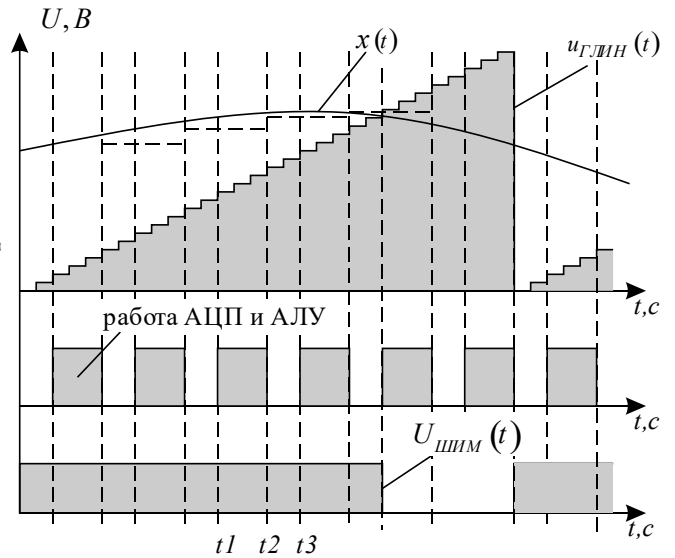
Таким образом, ЦШИМ с асинхронным изменением регистра сравнения в САР можно представить передаточной функцией вида

$$W(p) = e^{-\frac{T_{\Pi} p}{N}}, \quad (2)$$

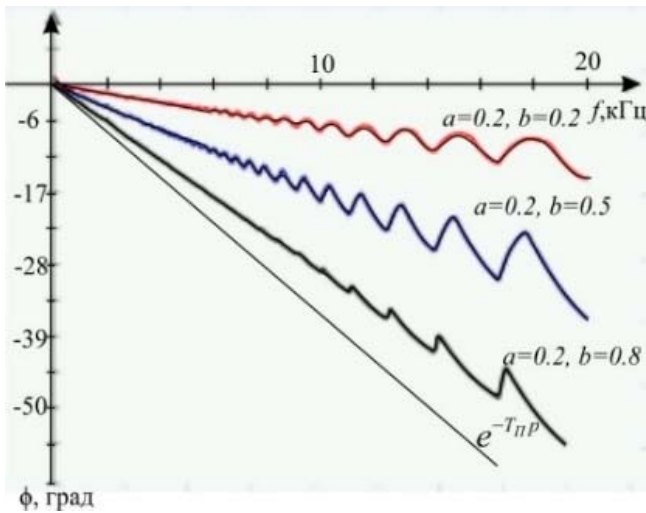
где T_{Π} – период работы ЦШИМ; N – количество изменений содержимого регистра сравнения на периоде ЦШИМ.



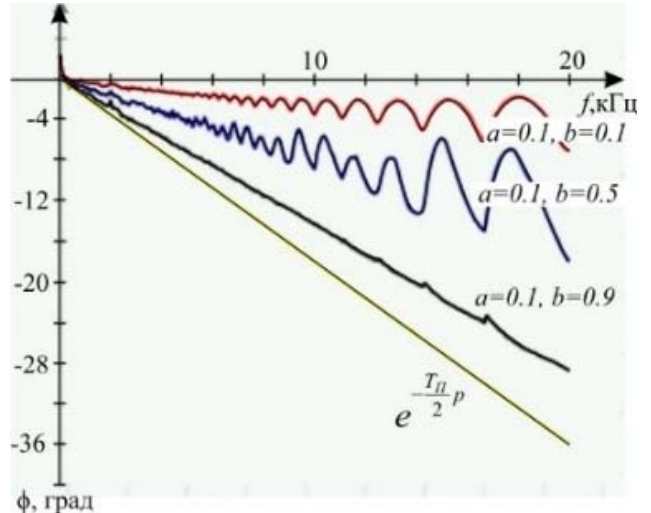
а



б



в



г

Рисунок 5 – Функциональная схема ЦШИМ с асинхронным изменением регистра сравнения и алгоритм его работы

В третьей главе приведен синтез корректирующих звеньев зарядно-разрядного канала и канала регулирования солнца ЭПК. Все полученные корректирующие имеют передаточную функцию вида

$$W_{kz} = K \frac{T1p + 1}{p(T2p + 1)} \quad (3)$$

и отличаются значением коэффициентов передаточной функции.

Экспериментально проверено совпадение частотных характеристик разомкнутых контуров регулирования с частотными характеристиками, определенными теоретически, и подтверждено выполнение требования заданного выходного импеданса.

Приведено упрощение импульсных моделей энергопреобразующих каналов ЭПК путем приведения их к нелинейным непрерывным моделям.

Экспериментально подтверждена сходимость результатов моделирования нелинейных непрерывных моделей и импульсных моделей каналов преобразования энергии.

Показано увеличение быстродействия моделирования нелинейных импульсных моделей более чем в 100 раз по отношению к импульсным моделям преобразователей, что демонстрируется результатами, приведенными в таблице 1.

Представлено описание полной испытательной имитационной модели ЭПК (рисунок 6), состоящей из семи модулей стабилизации напряжения, на которой экспериментально подтверждены: алгоритм минимального количества циклов и глубина разряда аккумуляторных батарей; требуемый выходной импеданс во всех режимах работы ЭПК; динамические характеристики стабилизации выходного напряжения ЭПК при сбросе/набросе тока нагрузки.

Таблица 1 – Результаты измерения времени моделирования

Преобразователь	Время симуляции, с	Время моделирования		$\frac{T_{ми}}{T_{мн}}$
		Импульс. модели $T_{ми}$, с	Непрерыв. модели $T_{мн}$, с	
Двунаправленный	100	484	3	161,3
Шунтовой	10	215	0,594	362
Вольтодобавочный	0,1	1408	0,819	1720

Экспериментально подтверждено, что при переходе из режима в режим перерегулирование напряжения составляет 0,88 В, а время переходного процесса не превышает 4,08 мс, что является удовлетворительным результатом для ЭПК.

Выходной импеданс ЭПК составляет не более 28,5 мОм, что удовлетворяет требованиям к ЭПК с выходной мощностью 5,1 кВт (не более 39,2 мОм) во всех режимах работы ЭПК.

Перерегулирование выходного напряжения при сбросе и набросе нагрузки амплитудой 20 А составило 0,534 В в режиме работы ЭПК «регулирования напряжения за счет тока заряда аккумуляторной батареи» и «регулирования напряжения за счет тока разряда аккумуляторной батареи».

В режиме работы «регулирования напряжения за счет тока солнечных батарей» составило 0,519 В.

При этом для современных ЭПК допускается перерегулирование на выходной шине до 3,5 В. Таким образом, полученные значения перерегулирований имеют значительный запас.

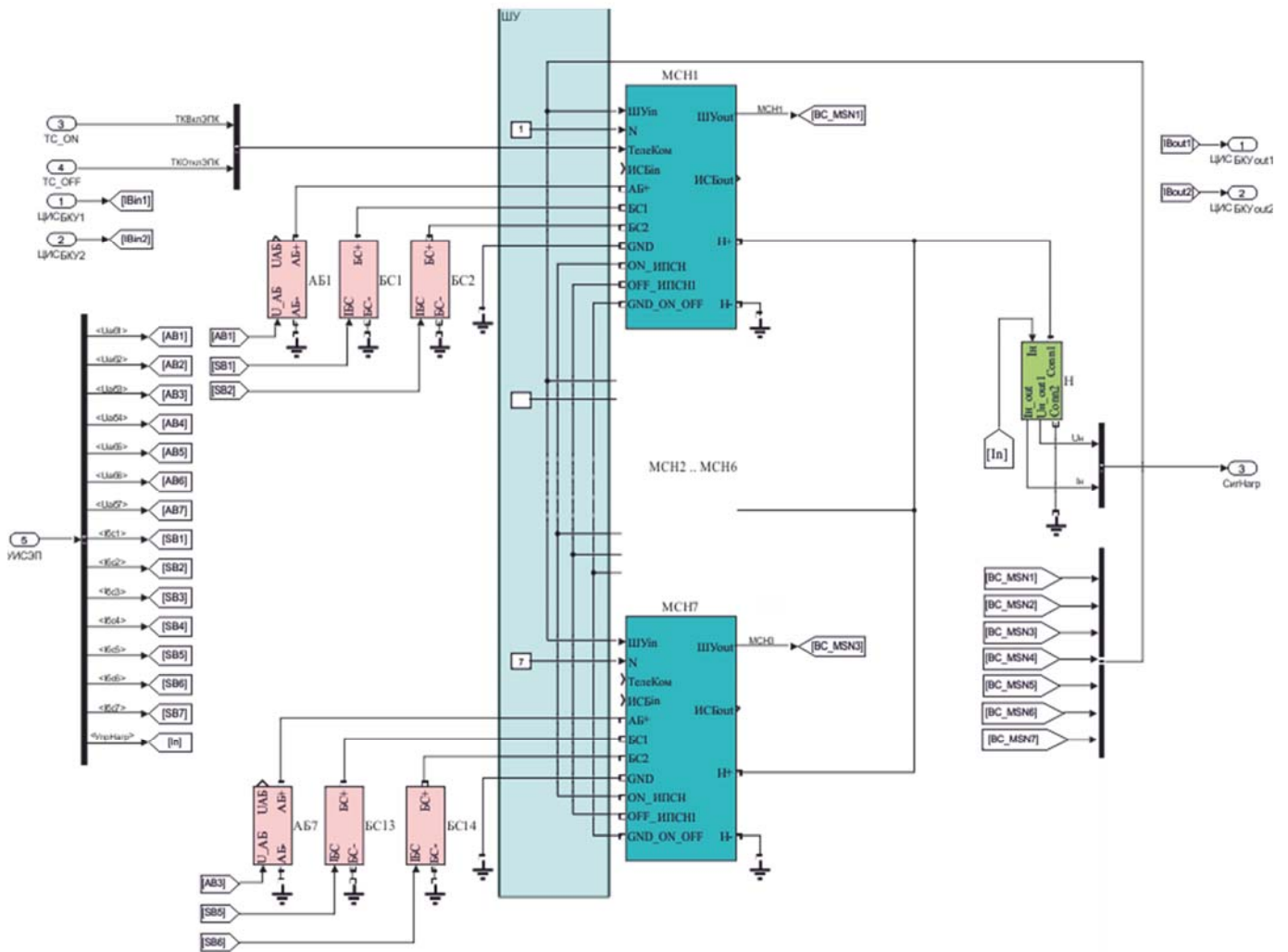


Рисунок 6 – Полная испытательная имитационная модель СЭП

В четвертой главе продемонстрирован системный подход (по Коневу Ю.И.) для проведения миниатюризации ЭПК, включающий совместное решение пяти взаимосвязанных проблем: энергетических, структурных, конструкторско-технологических, системных, организационных.

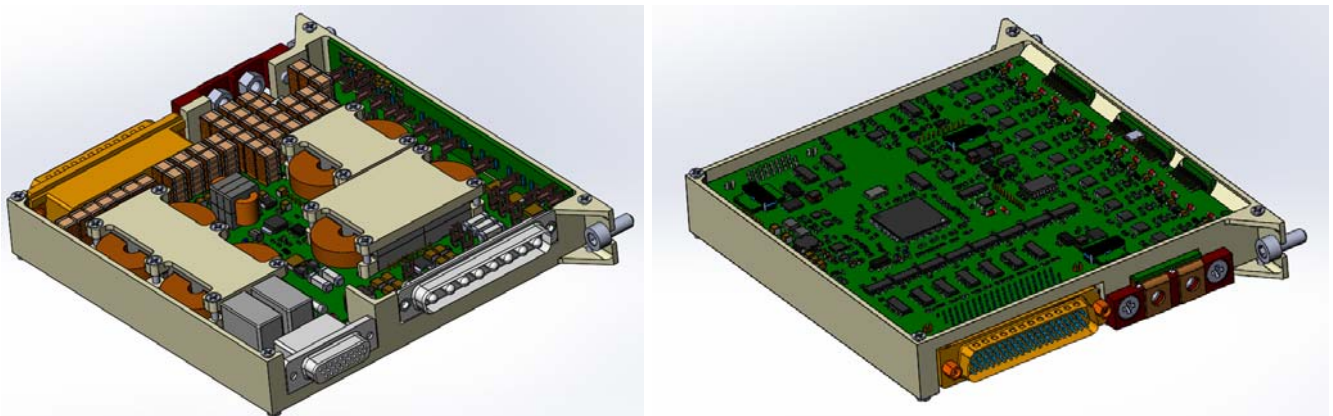


Рисунок 7 – Конструкция автономного унифицированного модуля стабилизации напряжения

Предложенные решения для миниатюризации ЭПК были реализованы при проведении опытно-конструкторских работ, в результате выполнения которых были достигнуты следующие размеры МСН 168x140x22 мм, получена удельная характеристика МСН при мощности 850 Вт 1500 Вт/дм³ (рисунок 7).

Представлен пример резервированного цифрового интерфейса связи модулей стабилизации напряжения (рисунок 8), реализующий передачу внутренних команд включения и отключения; обмен сигналами управляющего воздействия и телеметрии между модулями стабилизации напряжения; команды управления модулями и сигналы синхронизации этих модулей.

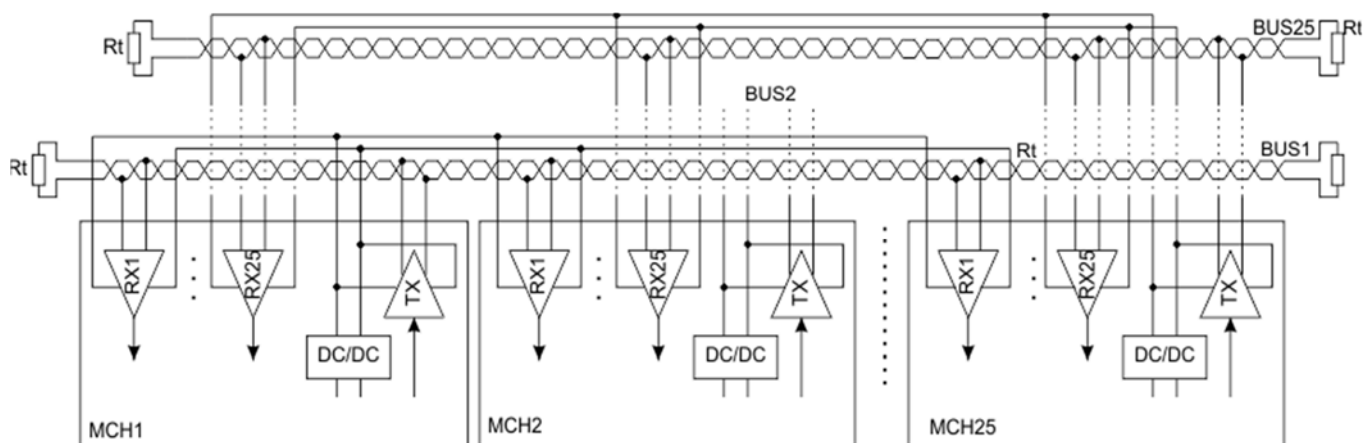


Рисунок 8 – Многоканальный, многоточечный интерфейс связи с отдельным питанием каналов

Приведен вариант реализации узла включения, отвечающего за прием телекоманд включения и отключения ЭПК и передачу данных команд по внутренней шине управления ЭПК между МСН.

Показан пример реализации управления силовыми GaN-транзисторами, обеспечивающий управление и питание драйверов ключей нижнего и верхнего уровней для двухмостовой вольтодобавочной схемы преобразователя с активным клампом, используемой в качестве энергопреобразующего устройства канала преобразования энергии зарядно-разрядного устройства.

В приложении А представлен скрипт программы Matlab для получения частотных характеристик зарядно-разрядного канала. **В приложении Б** представлен скрипт программы Matlab для получения частотных характеристик канала регулятора солнца. **В приложении В** представлено описание реализации блоков испытательной имитационной модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана структурная схема энергопреобразующего комплекса, отличающаяся тем, что она состоит из автономных унифицированных идентичных модулей стабилизации напряжения, которые позволяют наращивать выходную мощность ЭПК и обеспечивают при этом резервирование всех функциональных узлов. Реализованная структурная схема может быть применена не только в системах электропитания космических аппаратов, но и при проектировании других энергопреобразующих установок со статическими преобразователями энергии, имеющими блочно-модульную структуру.

2. Разработан многоканальный элемент выбора медианного сигнала, отличающийся алгоритмом сортировки элементов вектора входных сигналов, позволяющий производить операцию поиска медианного значения параллельно с быстродействием в один период тактового сигнала и пониженными требованиями к аппаратным ресурсам ПЛИС, это дает возможность реализовать резервированные ЭПК на основе автономных унифицированных модулей стабилизации напряжения и полностью создать СУ на кристалле ПЛИС, что обеспечит повышение удельных характеристик.

3. Разработан быстродействующий цифровой широтно-импульсный модулятор, позволяющий уменьшить задержки, связанные с алгоритмом работы широтно-импульсного модулятора первого рода, применяемого на текущий момент в современных цифровых системах управления импульсными преобразователями, и обеспечить быстродействие контуров обратных связей такое же, как в системах управления с аналоговыми ШИМ-контроллерами, что дает возможность повысить удельные характеристики модуля стабилизации напряжения, частоту единичного усиления контура регулирования тока и напряжения, снизить требования к емкости выходного фильтра.

4. Разработан цифровой интерфейс связи между автономными модулями стабилизации напряжения, позволяющий обеспечить требуемое быстродействие передачи сигнала управляющего воздействия с частотой 1 МГц и более, телеметрии и сигнала синхронизации между модулями, при этом создать требуемый уровень резервирования, компактность и гальваническую развязку. Повышение скорости передачи сигнала управляющего воздействия снижает фазовые задержки в контуре регулирования напряжения, дает возможность повысить частоту единичного усиления контура регулирования напряжения и удельные характеристики МСН.

5. Установлена количественная связь величины выходного импеданса с частотой единичного усиления контура обратной связи по напряжению и его запасом по фазе, определено количественное значение по выбору минимальной емкости выходного фильтра.

6. Благодаря предложенным рекомендациям по выбору минимальной емкости выходного фильтра для обеспечения требуемого выходного импеданса энергопреобразующего комплекса при заданной частоте работы силовых преобразователей и параметрах первичных источников питания была определена требуемая минимальная емкость выходного фильтра отдельных автономных модулей стабилизации напряжения. В результате общая емкость МСН в ЭПК с выходной мощностью 2,5 кВт снижена более чем в пять раз по сравнению с аналогом.

7. Разработана полная имитационная модель энергопреобразующего комплекса, реализующая предложенную структурную схему, с выходной мощностью 5,1 кВт, включающая семь автономных модулей стабилизации напряжения, позволяющая проводить моделирование работы ЭПК и отличающаяся реализацией импульсных преобразователей в виде непрерывных нелинейных моделей, что дает возможность получить адекватные результаты и более чем в 100 раз повысить быстродействие имитационного моделирования при исследованиях статических и динамических характеристик ЭПК в различных режимах работы ЭПК, включая переходы из одного режима в другой, при различных сочетаниях токов и

напряжений источников питания, буферных накопителей и нагрузки без потери точности результатов моделирования.

8. На разработанной имитационной модели подтверждены следующие основные функции, выполняемые ЭПК: алгоритм минимального количества циклов, глубины разряда и заряда аккумуляторных батарей; требуемый выходной импеданс и удовлетворительные результаты мгновенных переходных процессов, связанных с изменением режимов работы ЭПК.

9. Разработанная конструкция автономного модуля стабилизации напряжения позволяет реализовать энергопреобразующий комплекс мощностью 20,5 кВт с удельными характеристиками 1500 Вт/л, более чем в четыре раза превышающими удельные характеристики изготавливаемых на текущий момент ЭПК.

10. Результаты исследований внедрены при выполнении проекта «Разработка цифрового управляющего и силовых модулей энергопреобразующего комплекса для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов» в НИИ КТ ТУСУРа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Реализация двухконтурной системы управления энергопреобразующим комплексом в режиме стабилизации выходного напряжения каналом преобразования энергии аккумуляторной батареи / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, **В.А. Кабиров**, С.С. Тюнин, Д.А. Бородин // Доклады ТУСУР. – 2018. – № 4-1(21). – С. 61–70.

2. Усилители сигналов для моделей реального времени / Ю.С. Боровиков, А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, А.О. Сулайманов, А.И. Темчук, **В.А. Федотов (В.А. Кабиров)** // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 2(28). – С. 70–80.

Патенты на полезную модель РФ

3. Патент № 194732 Российская Федерация. Зарядно-разрядное устройство: заявл. 22.07.19 : опубл. 20.12.19 / Бородин Д.Б., Тюнин С.С., Винтоняк Н.П., **Кабиров В.А.**, Семенов В.Д., Шиняков Ю.А. – Бюл. № 35.

4. Патент № 2650875 Российская Федерация. Система электропитания космического аппарата : заявл. 19.09.16 : опубл. 18.04.18 / Кочура С.Г., Школьный В.Н., Шиняков Ю.А., Лопатин А.А., Сунцов С.Б., Семенов В.Д., **Кабиров В.А.**, Осипов А.В., Черная М.М., Латыпов Р.А. Бюл. № 9.

Статьи в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus/Web Of Science

5. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system / D.S. Torgaeva, **V.A. Kabirov**, V.D. Semenov, K.A. Akhtyrsky, A.I. Otto // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, N 24. – P. 9057–9070.

6. Analysis of structures of energy conversion complexes of spacecraft power supply systems in development of their digital control systems / **V.A. Kabirov**, N.P. Vintonyak, S.S. Tyunin, D.B. Borodin, V.D. Semenov, Ya.A. Shinyakov // 2nd International Scientific and Practical Conference on Innovations in Engineering and Technology, ISPCIET 2019: Conference Proceedings. – Veliky Novgorod: Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2019. – P. 1–13.

7. **Kabirov, V.A.** A digital control system for the power conditioning unit of spacecraft/ **V.A. Kabirov**, V.D. Semenov, Ya.A. Shinyakov // International review aerospace engineering: Praise Worthy Prize S. r.l. – 2019. – Vol. 12, N 1. – P. 26–34.

8. Modernization of the Weinberg's converter for the implementation of a charge-discharge device in the power supply system of a spacecraft / Y.A. Shinyakov, V.D. Semenov, M.P. Sukhorukov, D. Li, D.B. Borodin, V.A. Kabirov // 19th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies/and electron devices, EDM 2018: Conference Proceedings – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2018. – P. 533–539.

9. Digital pulse-width modulator with asynchronous change of compare register value and short delay time / V.A. Kabirov, V.D. Semenov, N.P. Vintonyak, D.B. Borodin, S.S. Tyunin // 14th international conference scientific-technical conference «Actual problems of electronic instrument engineering» APEIE-2018: Conference Proceedings. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2018. – Vol. 1, Part. 6. – P. 124–129.

10. Methodology to synthesis of digital regulator for solar battery energy conversion channel in the spacecraft power supply system / Ya. Shinyakov, V. Semenov, V. Kabirov, D. Torgaeva, M. Sukhorukov, R.S. Sevastyanov // 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON 2017): Conference Proceedings. – Novosibirsk: Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, 2017. – P. 346–350.

Другие публикации по теме диссертации

11. The method of synthesis of the digital controller for a solar energy conversion channel of the solar battery in the power supply system of a spacecraft / V.N. Shkolnyi, V.D. Semenov, V.A. Kabirov, M.P. Sukhorukov, D.S. Torgaeva // Siberian journal of science and technology. – 2019. – Vol. 20, N 1. – P. 74–86.

12. Гедзенко, И.Е. Синтез корректирующих звеньев для системы электропитания автономного объекта на основе двухтрансформаторного вольтодобавочного преобразователя / И.Е. Гедзенко, В.А. Кабилов // Сб. науч. тр. междунар. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – Т. 7. – С. 23–25.

13. Гедзенко И.Е. Сравнение фазовых характеристик цифровых широтно-импульсных модуляторов / И.Е. Гедзенко, В.Д. Семенов, В.А. Кабилов // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2021. – № 1-1. – С. 185–188.

14. Синтез цифровых корректирующих звеньев для корректора коэффициента мощности на основе повышающего преобразователя в программе Matlab / И.Е. Гедзенко, В.Д. Семенов, Д.Б. Бородин, В.А. Кабилов // Сб. избр. науч. ст. научной сессии ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2021. – № 1-1. – С. 231–235.

15. Кабилов, В.А. Двухконтурная система подчиненного регулирования / В.А. Кабилов, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск: В-Спектр, 2019. – № 1-1. – С. 173–177.

16. Цифровой широтно-импульсный модулятор с асинхронным изменением содержимого регистра сравнения и малым временем запаздывания / В.А. Кабилов, В.Д. Семенов, Н.П. Винтоняк, Д.Б. Бородин, С.С. Тюнин // Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 7. – С. 150–156.

17. Безруков, В.С. Малосигнальная модель НПП понижающего типа с управлением по мгновенному току / В.С. Безруков, В.А. Кабилов // Материалы докл. междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Т. 7. – С. 33–35.

18. Бородин, Д.Б. Модель преобразователя Вейнберга в базе коммутационных разрывных функций / Д.Б. Бородин, С.С. Тюнин, В.А. Кабилов // Материалы докл.

междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Т. 7. – С. 45–47.

19. Гедзенко И.Е. Двухтрансформаторный вольтодобавочный преобразователь с реверсированием тока нагрузки / И.Е. Гедзенко, **В.А. Кабиров**, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск: В-Спектр, 2020. – № 1-1. – С. 186–190.

20. Реализация цифровой системы управления высоковольтной системы электропитания космического аппарата / А.К. Матолыгин, **В.А. Кабиров**, Н.П. Винтоняк, С.С. Тюнин, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2018. – № 1-1. – С. 176–178.

21. Методика расчета математической модели преобразователя Вейнберга в базе коммутационных разрывных функций / В.Д. Семенов, Д.В. Шадрин, **В.А. Кабиров**, М.П. Сухоруков, Д.Б. Бородин, М.М. Черная // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Научная сессия ТУСУР». – Томск: В-Спектр, 2018. – № 1-2. – С. 189–192.

22. **Кабиров В.А.** Экспериментальное исследование малосигнальных частотных характеристик шунтового преобразователя напряжения / **В.А. Кабиров** // Материалы докл. XIII междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 54–56.

23. **Кабиров В.А.** Малосигнальная модель ШИМ-преобразователя при использовании метода коммутационных разрывных функций / **В.А. Кабиров**, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Научная сессия ТУСУР-2017». – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 215–219.

24. Двухнаправленный преобразователь Вейнберга для зарядно-разрядного устройства системы электропитания космических аппаратов / Д.Б. Бородин, С.С. Тюнин, **В.А. Кабиров**, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2017. – № 1-1. – С. 204–207.

25. Имитационная модель вольтодобавочного варианта схемы преобразователя Вейнберга / Д.Б. Бородин, С.С. Тюнин, **В.А. Кабиров**, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2017. – № 1-1. – С. 225–228.

26. Двухнаправленные преобразователи электрической энергии в автономных системах электропитания / С.С. Тюнин, Д.Б. Бородин, **В.А. Кабиров**, В.Д. Семенов // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2017. – № 1-1. – С. 230–233.

27. Калжанов К.Ж. Расчет и моделирование вольтодобавочной схемы зарядно-разрядного устройства / К.Ж. Калжанов, **В.А. Кабиров**, В.Д. Семенов // Сб. избр. ст. научной сессии ТУСУР. – 2022. – № 1-1. – С. 133–137.

Подписано в печать 16.10.2023 г.

Отпечатано в типографии Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. 8(3822) 533018.

Формат 60x84 1/16. Объем 1,2 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 243.