

На правах рукописи



**Луфт Сергей Валерьевич**

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДЛЯ  
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Харитонов Сергей Александрович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой Электроники и электротехники.

Официальные оппоненты: **Гарганеев Александр Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное  
государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский Томский политехнический  
университет», Отделение электроэнергетики и  
электротехники, профессор;

**Осипов Александр Владимирович**,  
кандидат технических наук, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Томский  
государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники», кафедра Промышленной  
электроники, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский федеральный  
университет».

Защита диссертации состоится «08» сентября 2022 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.173.04 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](http://www.nstu.ru)  
Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Технологические процессы гальванического производства играют значительную роль во многих отраслях промышленности. Гальванические покрытия широко используются для защиты деталей от коррозии, для восстановления изношенных деталей, а также для облегчения пайки. Часто такие покрытия позволяют заменить цветные, благородные или дефицитные металлы менее дорогими и более распространенными. Износостойкость гальванических покрытий зачастую является большей, чем у механически обработанных поверхностей. Кроме того, по экономичности гальванические покрытия превосходят другие виды покрытий. Наибольшее распространение гальваническая обработка получила в автомобильной, авиационной, электронной и радиотехнической промышленности, а также в строительстве и ювелирном производстве.

Для питания гальванической установки используется постоянный ток. От качества тока, питающего ванну, зависит качество гальванического покрытия, производительность установки, экономические показатели готового продукта. Поэтому основным требованием к преобразователям является коэффициент пульсаций выходного тока. Как правило, этот показатель равен примерно 5% от номинального выходного тока.

Современные выпрямители имеют огромную мощность и позволяют питать несколько ванн одновременно. Однако при параллельном подключении ванн возникает проблема распределения тока и контроля за процессами, протекающими в отдельных ваннах. Проблему распределения тока между ваннами можно решить и с помощью построения выпрямителей на основе ячеек небольшой мощности. Для каждой ванны выбирается необходимое количество ячеек и собирается шкаф с выпрямителем. Все полученные шкафы объединяются системой управления верхнего уровня для удобства контроля за каждой ванной.

**Степень разработанности темы исследования.** Анализ существующих на рынке решений среди современных выпрямительных установок показывает, что большая часть модульных систем не обеспечивает высоких показателей качества выходной электрической энергии во всем диапазоне выходной мощности.

Разработкой и производством оборудования для гальванических производств занимаются такие предприятия как «Интмаш», «Электромодуль», «IMPGOLD», «Страт», «CRS Industrial Power Equipment», «Навиком», «ЭлектроИнтел», «KraftPowercon», «Звезда Электроника», «ИВТ», «Научно-производственный консультационный центр Курсор», «РУМИКОНТ СПб», «Гальванопреобразователь», «Магистр». Решению схемотехнических и алгоритмических задач, применимых в гальванических выпрямителях, разработке алгоритмов управления системами с параллельным включением преобразователей напряжения, повышению энергоэффективности и надежности модульных систем электропитания посвящено множество работ зарубежных и отечественных ученых.

Среди них следует отметить труды следующих ученых: Людин В.Б., Шичков Л.П., Эпельфельд А.В., Мохова, О.П., Свистунов М.М., Шторк С.В., Калугин Н.Г., Васильев В.Ю., Антонов А.А., Козляев И.Д., Kolar J.W., Badstuebner U., Biela J., Jovanovic M.M., Lee F.C., Panov Y., Siri K., Zhang Y., Le Bolloch M., Rinne K., Lee C.Q., Redl R.

**Целью** научно-исследовательской работы является разработка для гальванических производств системы электропитания с повышенной энергоэффективностью, что достигается путем анализа и синтеза новых схемотехнических решений и алгоритмов управления. Для достижения изложенной выше цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Произвести анализ схем силовой части источника электропитания для гальванических производств с точки зрения уменьшения массы и габаритов изделия.
2. Произвести анализ способов распределения токовой загрузки преобразователей в рамках системы с параллельным включением преобразователей напряжения.
3. Разработать имитационную модель синтезированной системы электропитания, позволяющую получить её статические и динамические характеристики, и оценить адекватность предложенных способов управления.
4. Практически реализовать и проверить работоспособность модульного источника электропитания для гальванических производств.
5. Разработать алгоритм оптимизации расчета параметров силовой цепи преобразователя с точки зрения минимизации массы источника электропитания.

**Объектом исследования** является модульный источник электропитания для гальванических производств. **Предметом исследования** являются энергетические и массогабаритные характеристики преобразователей с «мягкой» коммутацией, построенных с применением планарной технологии изготовления магнитных элементов, а также точность распределения токов между модулями в рамках параллельной работы.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Предложена методика комплексного расчета основных параметров преобразователя с фазовым управлением для минимизации массы изделия.
2. Впервые установлено, что в аварийных режимах работы при обрыве связи у одной из ячеек, после восстановления передачи данных может возникнуть ненулевая статическая ошибка в выходном напряжении системы.
3. Разработана модернизированная система управления преобразователями, позволяющая устранить статическую ошибку в выходном напряжении после восстановления передачи данных между ячейками.
4. Предложен алгоритм управления системой электропитания, состоящей из параллельно включённых преобразователей напряжения, позволяющий улучшить качество выходной энергии в области малой выходной мощности.

**Практическая значимость научно-исследовательской работы:**

1. Разработана программа для комплексного расчета основных параметров преобразователя с фазовым управлением.

2. Разработана ячейка электропитания для гальванической установки с улучшенными массогабаритными показателями.

**Теоретическая значимость научно-исследовательской работы:**

1. Синтезированы имитационные модели для проверки корректности расчетных соотношений для различных конфигураций схем преобразователя с фазовым управлением.

2. Разработан алгоритм управления системой электропитания гальванической установки, улучшающий энергетические показатели системы в области малой выходной мощности.

3. Предложена система управления преобразователем с нулевой статической ошибкой в выходном напряжении после выхода из аварийного режима работы.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач были использованы элементы теории электрических и магнитных цепей, методы схемотехнического моделирования с использованием программного обеспечения MATLAB-Simulink и PSIM, программа для моделирования физических процессов Elmer, а также физическое макетирование.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ устранения ненулевой статической ошибки в выходном напряжении после выхода из аварийного режима работы системы, реализуемый с использованием дополнительных пакетов данных с значениями максимальной и минимальной интегральной части регулятора параллельной работы.

2. Способ повышения точности распределения токов между ячейками до 12% с использованием управления по среднему току преобразователей с учетом 10% разброса показаний датчиков токов силовых ячеек.

3. Алгоритм управления системой электропитания, повышающий КПД системы путем отключения части модулей при малой выходной мощности.

4. Схемотехнические и конструктивные решения, уменьшающие массогабаритные показатели системы электропитания гальванической установки на 13%.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается корректной постановкой задачи, адекватностью разработанных моделей, а также результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований на имитационной модели и физическом макете.

**Внедрение результатов работы.** Результаты научно-исследовательской работы внедрены в компании ООО «Интеллектуальные машины». Полученный опыт в сфере параллельной работы преобразователей используется при реализации других проектов в компании ООО «Интеллектуальные машины».

**Личный вклад автора.** Материалы диссертации являются обобщением работ автора, выполненных в период с 2015 по 2020 года, и отражают его личный вклад в решаемую задачу. Основные научные результаты получены автором самостоятельно. Опубликованные работы написаны в соавторстве с руководителем и другими сотрудниками, принимавшими участие в разработке и практической реализации источника питания гальванических установок. Совместно с научным руководителем выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и практических исследований.

Автором совместно с Соловьевым А.А., Классен Т.С., Мурашко А.С. и Христоробовым А.А. разработан и изготовлен источник питания гальванических установок с выходным током 170 А и напряжением 12 В, являющийся составляющей частью источника питания гальванических установок, практические и теоретические исследования которого проведены автором в команде с Классен Т.С. и Соловьевым А.А. Алгоритм отключения ячеек предложен и исследован автором самостоятельно.

**Соответствие научной специальности.** Основные положения диссертационной работы соответствуют формуле и пунктам 1, 3, 4 паспорта специальности 05.09.03 – «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; 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.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих научных семинарах и конференциях: 53-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2015, Новосибирск, НГТУ, 2015 г.; XVIII Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM», Новосибирск, НГТУ, 2017 г.; XIX Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM», Новосибирск, НГТУ, 2018 г.; XX Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM», Новосибирск, НГТУ, 2019 г.; Научные заседания кафедры «Электроники и Электротехники» ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск, 2016 – 2020 г.

**Публикации по теме диссертации.** По основным научным результатам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных высшей аттестационной комиссией РФ, 7 публикаций, входящих в международную систему цитирования «Scopus» и/или «Web of Science», а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка из 132 использованных источников и двух приложений. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, иллюстрируется 88 рисунками и двумя таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены сведения об апробации и

публикациях, личном вкладе автора в работу, а также представлена структура работы.

**Первая глава** посвящена анализу структур построения систем электропитания для гальванических производств, представленных в данный момент на рынке. Показано, что в большинстве современных систем электропитания применяется принцип параллельного включения модулей для увеличения суммарной выходной мощности. Отмечено, что важным конкурентным преимуществом является защита компонентов от агрессивной внешней среды, имеющей место в производственных цехах. Использование высокочастотных схем преобразования позволяет избавиться от тяжелых сетевых трансформаторов, улучшить качество выходного тока при средних и малых нагрузках.

Результатом произведенного обзора схем преобразователей постоянного напряжения с гальванической изоляцией стал выбор схемы преобразователя с фазовым управлением для реализации модуля системы электропитания гальванической установки. Для улучшения качества входного тока преобразователя предложено использовать высокоэффективный корректор коэффициента мощности с чередованием фаз. Обоснована целесообразность использования силовой схемы преобразователя напряжения, представленной на Рисунке 1.

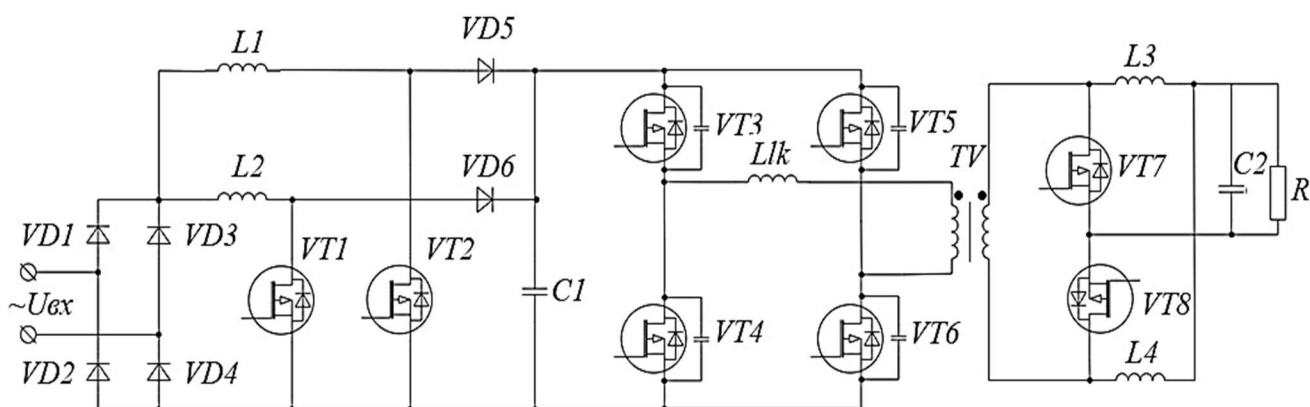


Рисунок 1 – Силовая схема преобразователя напряжения для гальванической установки

На основе обзора основных способов равномерного распределения мощности между преобразователями напряжения было принято решение использовать способ управления по среднему току преобразователей, т.к. это позволяет обеспечить стабильность сигналов ошибок по току и помехоустойчивость системы. В качестве средства для передачи данных о токах преобразователей между собой выбран цифровой интерфейс связи CAN, обладающий хорошей помехозащищенностью и арбитражем доступа к сети, что позволяет сократить до минимума количество передаваемой по шине информации.

В общем случае, для рассмотрения работы преобразователей напряжения в процессах модификации поверхности металла используется схема, представленная на Рисунке 2.

Для процессов гальванического осаждения металлов в данной схеме можно пренебречь ЭДС  $E_H$ , т.к. ее величина не более 0,5 В, что на порядок ниже выходного напряжения выпрямителя. Также можно пренебречь индуктивностью электродов и подводящих шин  $L_H$ , т.к. при малой частоте реверсивных импульсов тока (до 100 Гц) она не оказывает существенного влияния на систему. Исходя из вышеизложенных допущений, в работе будет рассматриваться работа выпрямителя на активное сопротивление нагрузки.

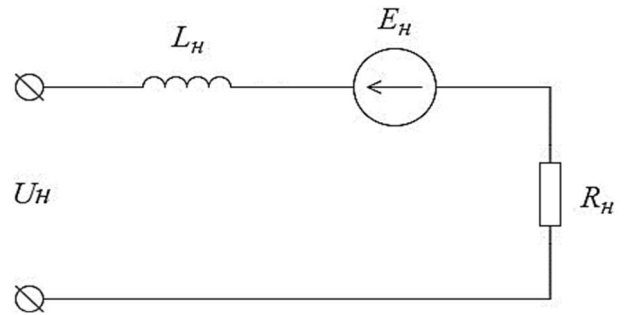


Рисунок 2 – Схема замещения нагрузки для анализа работы выпрямителя в процессах модификации поверхности металла

**Вторая глава** посвящена описанию работы преобразователя с фазовым управлением, методике расчета его параметров, а также синтезу системы управления преобразователем и системой в целом. Предложенная методика комплексного расчета параметров преобразователя позволяет произвести расчет с учетом минимизации массы изделия.

Разработанная математическая модель позволяет учесть диапазон входного напряжения, желаемый диапазон нагрузок для достижения «мягкой» коммутации силовых ключей, максимально допустимое обратное напряжение на ключах выпрямителя, диапазон возможных частот коммутации силовых ключей. Блок-схема алгоритма расчета параметров преобразователя представлена на Рисунке 3.

Входными данными для расчета являются следующие величины:

- $U_{in\,nom}$ ,  $U_{in\,min}$ ,  $U_{in\,max}$  – номинальное, минимальное и максимальное входное напряжение;
- $U_{out\,nom}$ ,  $U_{out\,min}$ ,  $U_{out\,max}$  – номинальное, минимальное и максимальное выходное напряжение;
- $P_{out\,nom}$  – номинальная выходная мощность;
- $P_{out\,max}$  – максимальная выходная мощность в режиме перегрузки;
- $t_{dt}$  – «мертвое» время между импульсами управления ключами стойки инвертора;
- $\Delta I_L$  – пульсации тока в фильтровых дросселях;
- $I_{out\,min}$  – минимальный ток нагрузки, при котором преобразователь еще работает в режиме «мягкой» коммутации.

Основными ограничивающими факторами для расчета являются следующие:

- масса моточных элементов;
- частота коммутации;
- максимальное обратное напряжение на ключах выходного выпрямителя.

Расчет производится итерационно. В качестве переменной величины используется коэффициент трансформации силового трансформатора.



Верхний предел коэффициента трансформации выбирается исходя из минимально возможного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, необходимого для удержания номинального выходного напряжения. Нижний предел коэффициента трансформации выбирается исходя из максимально допустимого напряжения выходных ключей.

Синтез контуров регулирования производится параметрическим методом с использованием передаточных функций преобразователя. Система управления импульсным преобразователем состоит из двух контуров – по току индуктивностей и по выходному напряжению, как показано на Рисунке 4. Контур включены параллельно, т.е. в каждый момент времени работает только один контур регулирования, который обладает наименьшим выходным сигналом. Корректирующее устройство в контурах регулирования разделено на две части.

Первая часть – это пропорциональные коэффициенты  $G_{ci0}$  и  $G_{ci1}$ , вторая часть – общая динамическая составляющая регулятора  $G(s)$ . Данная структура системы управления позволяет ограничить ток преобразователя, при этом не уменьшая полосу пропускания контура по напряжению. Данная система управления реализована в аналоговом виде.

Для реализации системы управления по среднему току преобразователей был выбран цифровой интерфейс CAN, так как он обладает приемлемой скоростью обмена данными, хорошей помехозащищенностью, контролем ошибок передачи и приема, а также особым способом получения устройством доступа к сети.

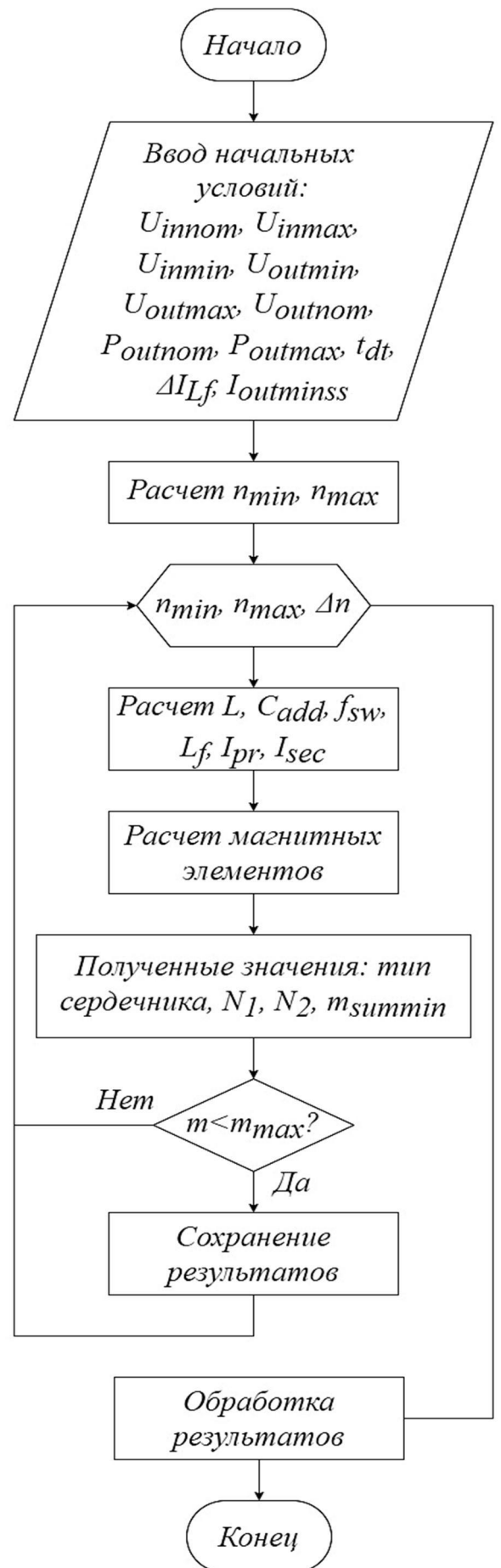


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета параметров преобразователя

Арбитраж доступа к сети происходит следующим образом. При свободной шине любой узел может начинать передачу в любой момент времени. В случае одновременной передачи данных двумя или более узлами происходит арбитраж доступа. Для проведения арбитража каждое сообщение,

называемое кадром данных, содержит свой код арбитража (идентификатор), как показано на Рисунке 5. Передавая идентификатор, узел одновременно проверяет состояние шины. Если при передаче рецессивного бита (логическая «1») принимается доминантный (логический «0») – считается, что другой узел передаёт сообщение с большим приоритетом, и существующая передача откладывается до момента освобождения шины, как показано на Рисунке 6. Таким образом, доступ к шине получает устройство с наименьшим идентификатором.

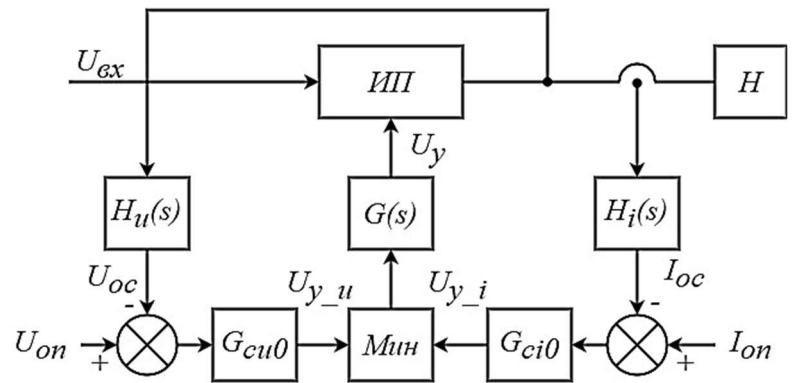


Рисунок 4 – Структура системы управления

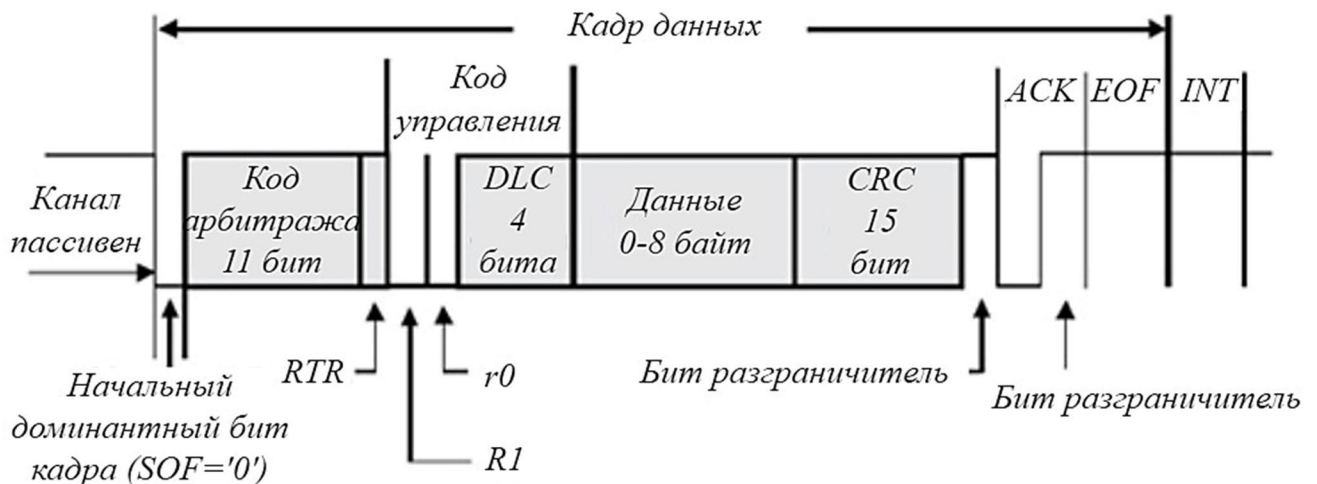


Рисунок 5 – Структура кадра данных

Для реализации управления по среднему току преобразователей необходимо знать токи всех ячеек и усреднить их. Однако, предполагая, что токи в системе распределяются с достаточной точностью, можно ограничиться данными о двух токах – минимальном среди преобразователей и максимальном. С помощью интерфейса CAN это можно реализовать следующим образом. Величина тока преобразователя инвертируется и помещается в поле идентификатора при отправке сообщения. Сообщения от разных ячеек, содержащие идентификаторы с информацией о токе, одновременно отправляются на шину. Арбитраж выигрывает ячейка, имеющая наименьший идентификатор, то есть наибольший ток. Все ячейки считывают сообщение с шины, снова инвертируют идентификатор для получения максимального тока. Аналогично производится передача данных о минимальном токе ячеек, с той лишь разницей, что перед отправкой он не инвертируется.

Полученные значения используются для расчета среднего тока ячеек, который используется в качестве сигнала задания на собственные токи преобразователей.

После приема сообщения с шины все ячейки снова одновременно отправляют обновленную информацию о собственном токе на шину. Чтобы исключить коллизию на шине интерфейса при возникновении ситуации, когда несколько преобразовательных ячеек имеют одинаковый выходной ток, в конец идентификатора устройства добавляется серийный номер преобразователя. Тогда из всех ячеек, проводящих одинаковый ток, арбитраж выигрывает ячейка с наименьшим серийным номером.

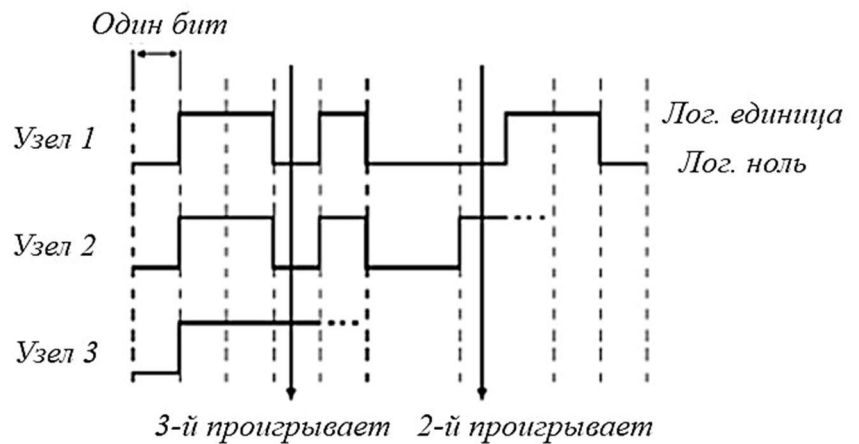


Рисунок 6 – Процедура арбитража доступа к сети

**Третья глава** посвящена имитационному моделированию системы электропитания. В главе также представлено явление возникновения статической ошибки в выходном напряжении при многократном обрыве связи у одного из модулей системы питания.

Частота передачи сообщений по интерфейсу CAN составляет 2 кГц. В систему введены разбросы коэффициентов передачи датчиков токов и напряжений: датчики напряжения имеют разброс 2%, датчики тока 10%. Частота вычисления скользящего среднего составляет 1 кГц. На Рисунке 7 представлены результаты моделирования сброса и наброса нагрузки 45%-90%-45%. В установившемся режиме при 45% нагрузки минимальный ток среди модулей составляет 71,9 А, максимальный – 80,4 А. Разброс токов составляет 12%. В установившемся режиме при 90% нагрузки минимальный ток среди модулей составляет 144,7 А, максимальный – 159,9 А. Разброс токов составляет 11%.

В результате моделирования выявлено, что в случае многократного обрыва связи у одной из ячеек, выходное напряжение системы постепенно увеличивается, как показано на Рисунке 8.

Из Рисунка 8 видно, что после завершения каждого переходного процесса, связанного с обрывом связи одного из модулей, выходное напряжение не выходит на заданный уровень. Более того, с каждым новым переходным процессом разность между заданным значением напряжения и фактическим выходным напряжением возрастает. При этом контур распределения токов выполняет свою задачу – токи преобразователей после переходных процессов выравниваются между собой.

Механизм этого явления заключается в том, что контур обеспечения равномерного распределения токов в системе воздействует на собственный контур управления по напряжению каждого преобразователя. Разброс характеристик составных элементов преобразователей приводит к тому, что сумма выходных

величин регуляторов  $G_{cs}(s)$  в установившемся режиме не равна нулю. Некоторые модули могут изменить свой выходной ток быстрее других, что приводит к изменению «среднего» значения токов преобразователей. Чтобы нивелировать этот эффект, необходимо устремить сумму интегральных частей регуляторов к нулю.

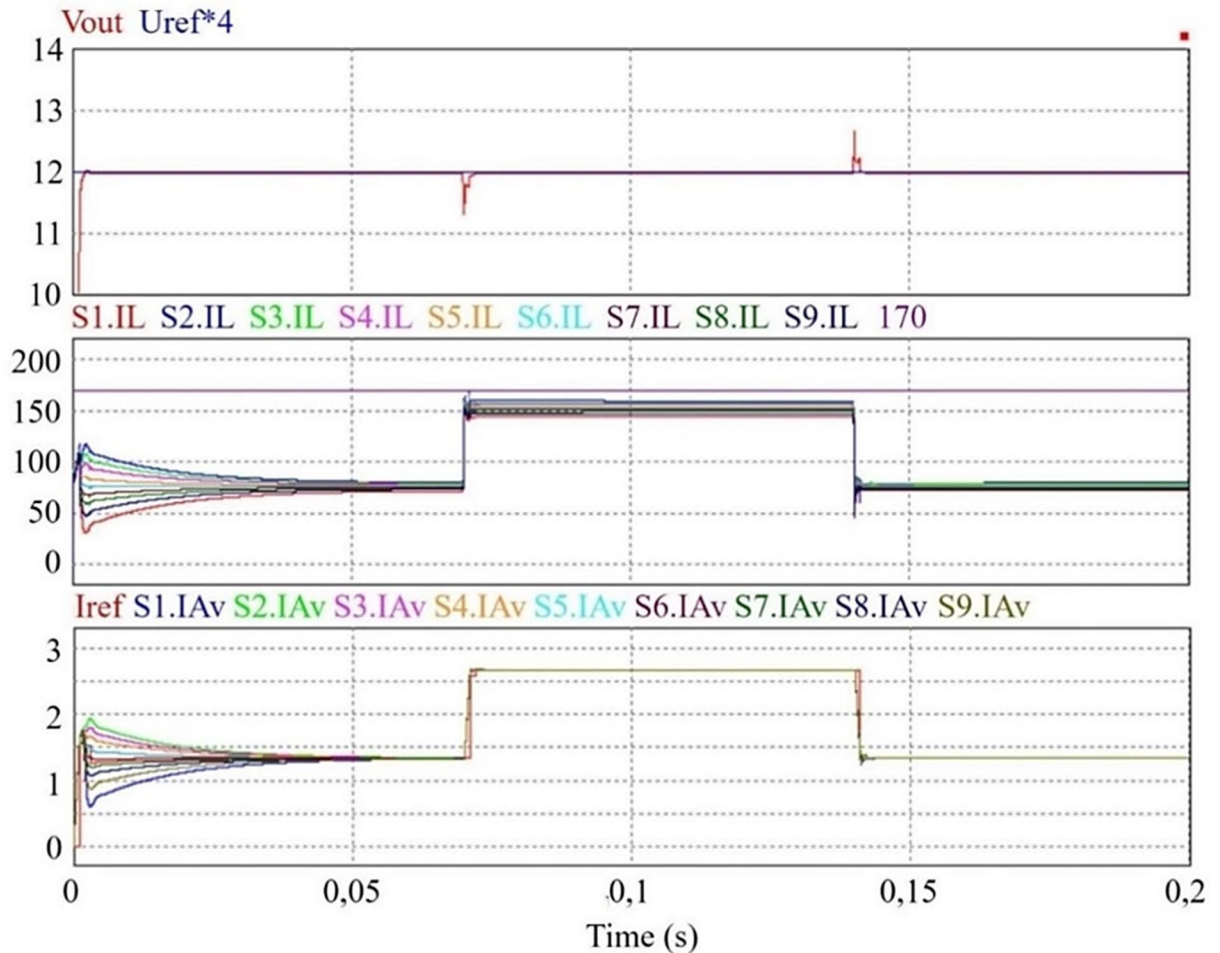


Рисунок 7 – Эпюры выходного напряжения, токов индуктивностей, и скользящих средних по токам модулей при сбросе-набросе нагрузки 45%-90%-45%

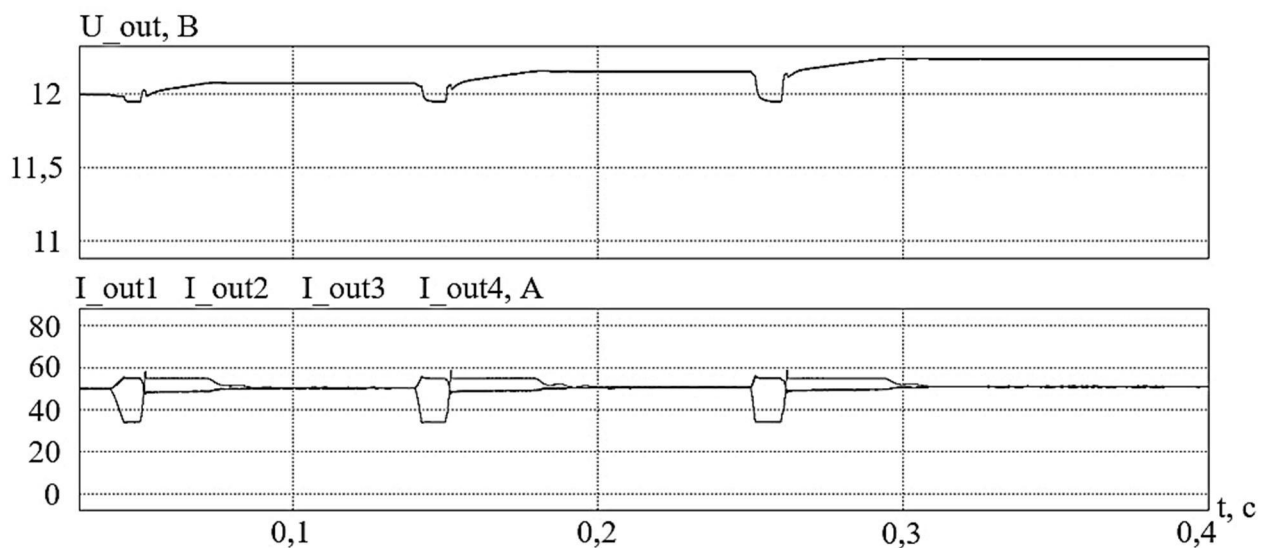


Рисунок 8 – Эпюры выходного напряжения, выходных токов модулей при многократном обрыве связи

Для этого было предложено ввести две дополнительные посылки с данными, передаваемыми по шине CAN. По аналогии с токами преобразователей, две дополнительные посылки содержат информацию о максимальной и минимальной среди преобразователей добавке регулятора распределения токов. Полученные добавки усредняются и вычитаются из интегральных составляющих регуляторов по распределению токов преобразователей, как показано на Рисунке 9.

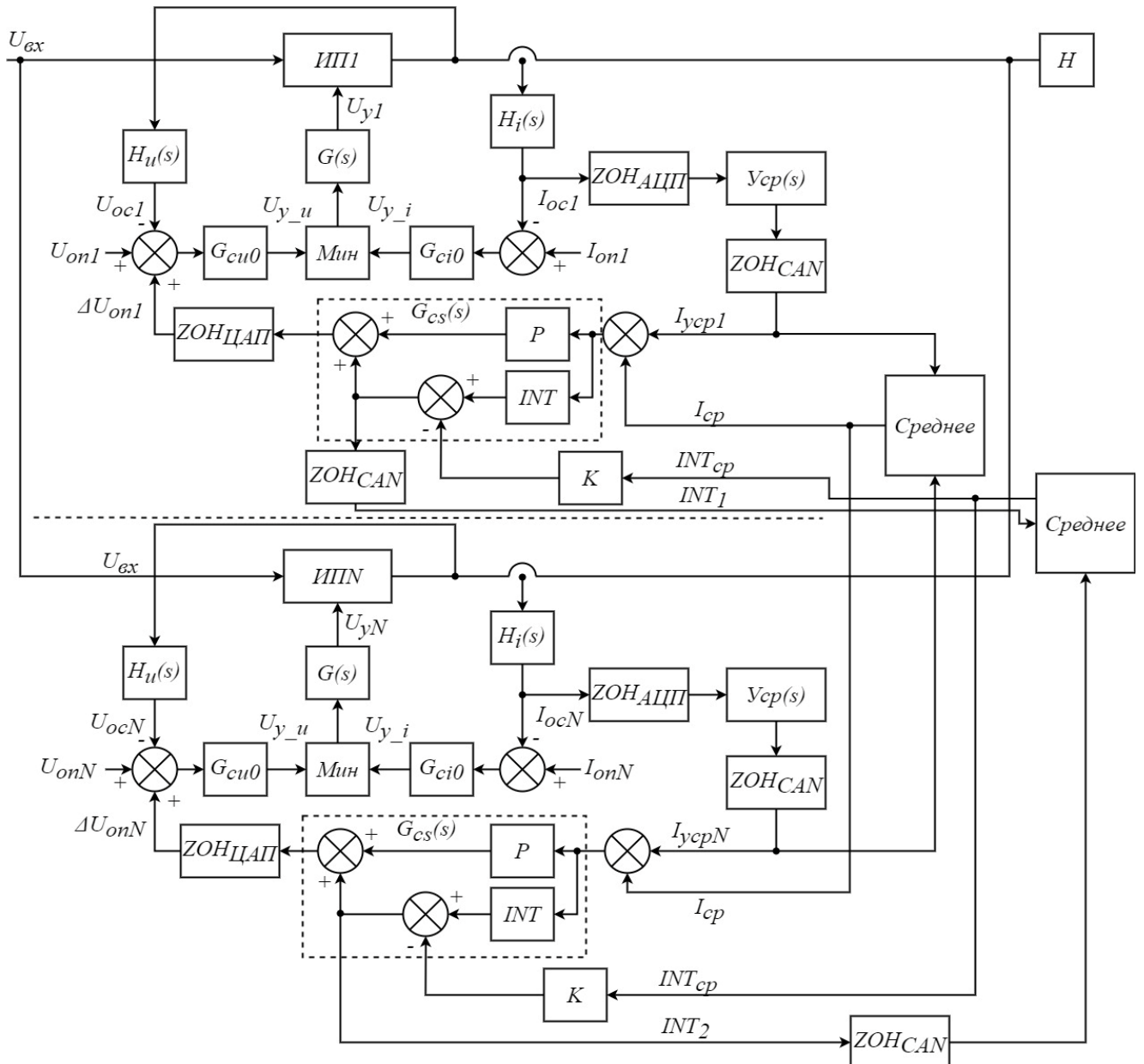


Рисунок 9 – Структурная схема N параллельно включенных преобразователей с предложенным алгоритмом компенсации ошибки по напряжению

Коэффициент K для передачи «среднего» значения интегральных частей регуляторов преобразователей был подобран опытным путем с использованием имитационной модели. На Рисунке 10 представлены результаты имитационного моделирования системы, состоящей из четырех преобразователей напряжения, работающих на общую нагрузку при внедрении посылок, содержащих данные об интегральных частях регуляторов. По результатам моделирования можно сделать

вывод, что предложенный способ устранения ошибки в выходном напряжении системы позволяет нивелировать последствия переходных процессов. Ошибка более не накапливается с каждым новым переходным процессом.

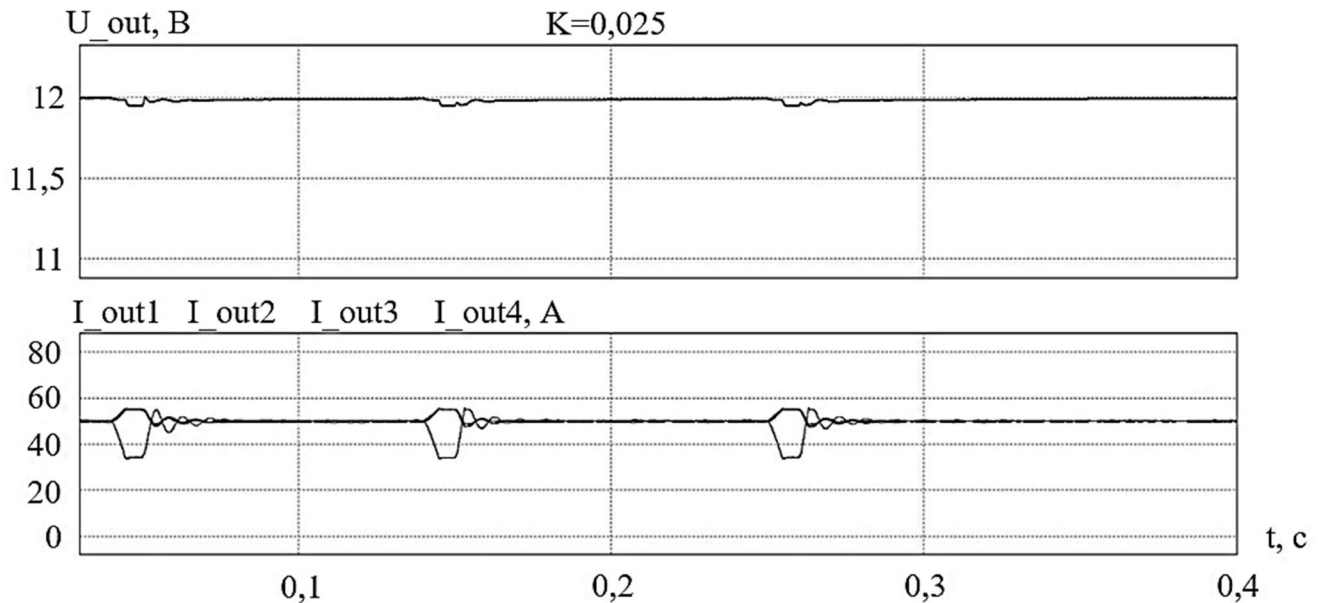


Рисунок 10 – Результаты имитационного моделирования системы электропитания

**В четвертой главе** описана физическая реализация модуля электропитания, а также алгоритмы управления, позволяющие увеличить энергоэффективность системы в целом.

При практической реализации модуля электропитания во внимание принимался тот факт, что работа системы будет производиться в агрессивной окружающей среде с парами электролитов. Для обеспечения защиты компонентов и печатных плат было принято решение изготовить преобразователь с максимально закрытым корпусом. С целью улучшения массогабаритных показателей, магнитные элементы выполнены по планарной технологии, что позволяет эффективно отводить тепло от сердечников в закрытом корпусе.

На Рисунке 11 представлена фотография двух ячеек системы электропитания.

Для сравнения, на Рисунке 12, а) представлен способ охлаждения трансформатора, выполненного по классической технологии. Для отведения тепла от сердечника используются тепловые трубки, которые закреплены на феррите с помощью эпоксидной смолы и теплопроводящих прокладок. Радиатор трубки вклеены на теплопроводящий клей. Все дополнительные меры для

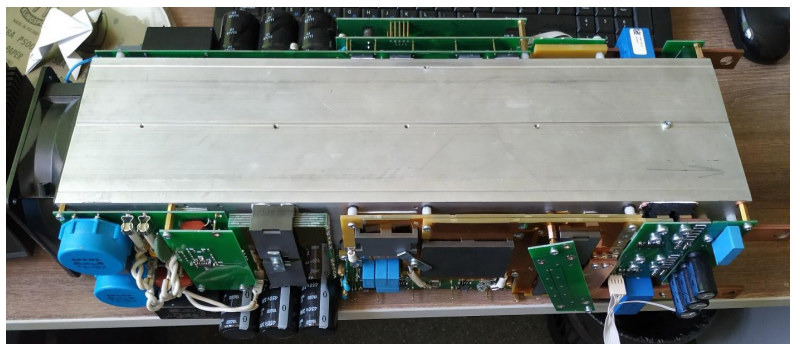


Рисунок 11 – Фотография разработанной ячейки электропитания

В

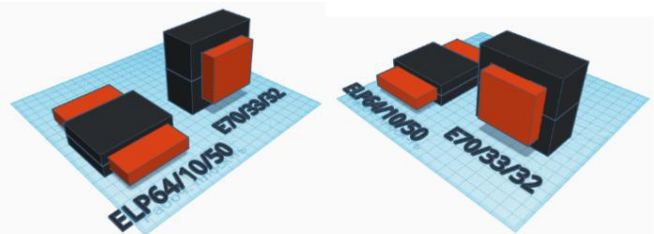
улучшения теплоотвода увеличивают сложность сборки силового модуля, что ведет к увеличению затраченного времени и стоимости.

Для замены разработанного планарного трансформатора на основе сердечника ELP64/10/50 «классическим», необходимо было бы использовать сердечник E70/33/32 с тепловыми трубками. Схематичное сравнение их размеров представлено на Рисунке 12, б). По расчетам, объем «классического» трансформатора в 2,4 раза больше, чем объем планарного трансформатора.

В итоге, полученные габариты двух ячеек электропитания, мощностью 4 кВт (12 В, 340 А) составляют: ширина 200 мм, длина 580 мм (с учетом выходных шин), высота 145 мм. Для сравнения массогабаритных показателей систем электропитания представлена Таблица 1. В ней собраны системы электропитания от различных производителей, построенные по модульному принципу. Выпрямители GALS 12/680 и GALS 12/6800 построены на базе разработанной ячейки электропитания.



а)



б)

Рисунок 12 – а) Фотография преобразователя питания для гальванической установки с «классическим» трансформатором; б) Схематичное изображение трансформаторов равной мощности, выполненных по планарной и «классической» технологии

Таблица 1 – Характеристики выпрямителей для гальванических производств

Название	Р <sub>ВЫХ</sub> ,	м,	V,	Р <sub>ВЫХ</sub> /V,	Р <sub>ВЫХ</sub> /м,	η,	χ
	Вт	кг	м <sup>3</sup>	кВ/м <sup>3</sup>	кВ/кг	%	
ИПГ-12/600-380 IP54	7200	55	0,13	56,25	0,13	88	0,86
ИПГ-12/6000-380 IP54	72000	375	0,62	116,1	0,19	88	0,86
Flexkraft AIR-12/600	7200	49	0,14	52,6	0,15	90	0,93
Flexkraft AIR-12/6000	72000	315	0,56	129	0,23	90	0,93
Q500 12V/550A DC	6600	79	0,1	66	0,083	87	0,93
Q500 12V/5000A DC	60000	263	0,41	146	0,23	87	0,93
Пульсар СМАРТ 1000/12	12000	72	0,16	75	0,17	90	0,97
Пульсар СМАРТ 8000/12	96000	398	0,57	168	0,24	90	0,97
GALS 12/680	8000	48	0,1	80	0,17	94	0,99
GALS 12/6800	80000	323	0,42	190	0,25	94	0,99

В результате проведенного физического эксперимента была получена характеристика КПД преобразователя, представленная на Рисунке 13. Из Рисунка 13 видно, что в области нагрузок, близких к номинальной, КПД падает, что связано с увеличением потерь в выходном синхронном выпрямителе. В случае с преобразователем, построенным по схеме мостового преобразователя с фазовым управлением, в области малых нагрузок наблюдается снижение КПД, т.к. при малом токе через коммутационную индуктивность ее энергии недостаточно для обеспечения «мягкой» коммутации силовых ключей, что ведет к росту потерь. Таким образом, если в системе при распределении токов на малых нагрузках будут работать все модули, то КПД системы будет с высокой точностью повторять КПД единичного преобразователя.

Для улучшения энергетических характеристик системы электропитания можно добавить алгоритм, который позволит отключать часть преобразователей при работе с малой выходной мощностью. На Рисунке 14, а) показана блок-схема предложенного алгоритма запуска системы электропитания с выбором оптимального количества силовых модулей.

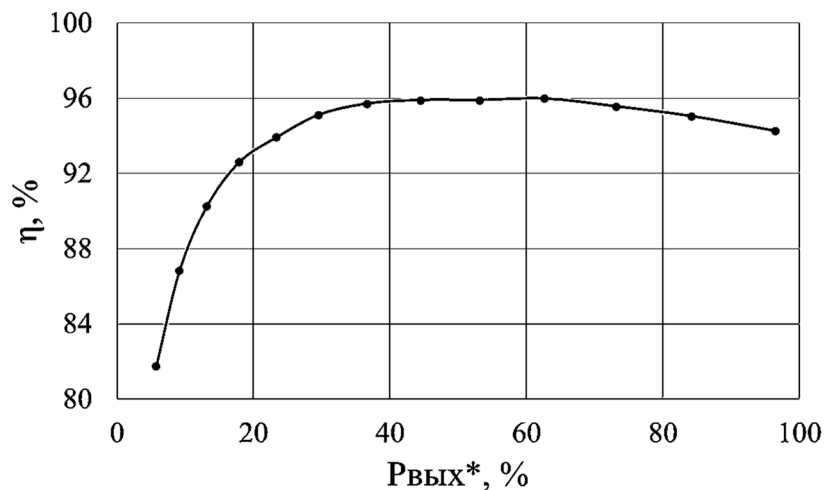


Рисунок 13 – КПД одного преобразователя

При начальном запуске системы электропитания оператор вводит требуемые значения выходного тока и выходного напряжения системы, после чего нажимает кнопку «Включение». Панель оператора считывает количество силовых модулей в составе системы электропитания, готовых к работе. Далее, исходя из полученных данных рассчитывается мощность, требуемая от одного силового модуля после включения системы. В памяти панели оператора хранится таблица со значениями выходной мощности и КПД силовых модулей, составляющих систему электропитания. В цикле производится сравнение рассчитанного значения мощности, требуемой от одного модуля с точкой, имеющей максимальный КПД в таблице. С учетом формы графика, показанного на Рисунке 13, если рассчитанное значение мощности больше, чем мощность в точке максимального КПД, то система включается с текущим значением количества силовых модулей, иначе количество модулей уменьшается и расчет производится заново. В случае, если требуется отключить часть силовых модулей, то для более равномерного распределения нагрузки по ним, отключаются те модули, счетчик часов наработки которых больше. После запуска системы электропитания, панель оператора продолжает собирать данные о текущем выходном токе, выходном напряжении и количестве задействованных силовых ячеек в системе. На протяжении работы системы выполняется алгоритм, представленный на Рисунке 14, б). В таком случае, КПД системы примет следующий вид, представленный на Рисунке 15.



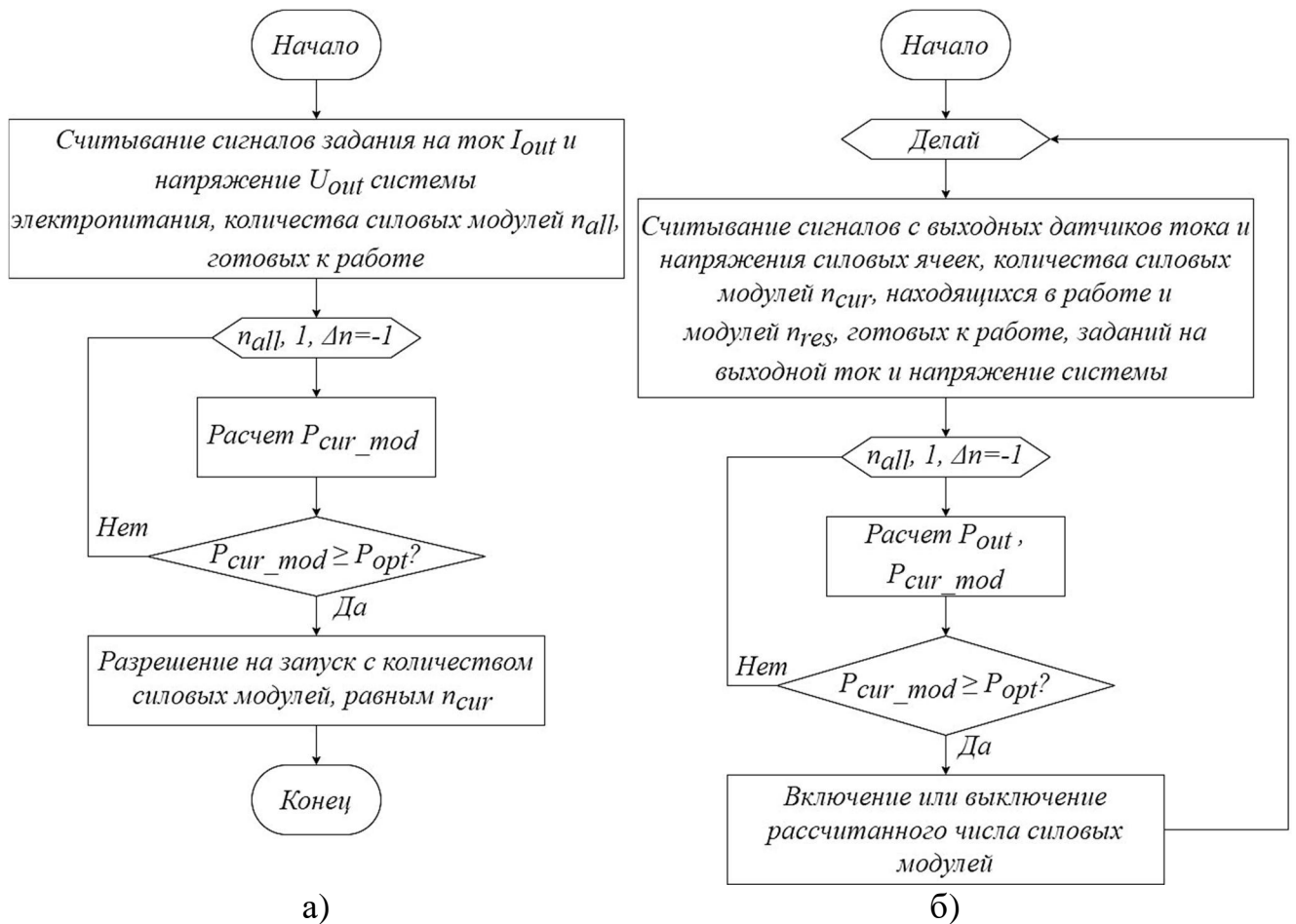


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма: а) запуска системы электропитания; б) оптимизации количества активных силовых модулей системы электропитания для достижения максимального КПД системы

Реализация отключения части ячеек при малых нагрузках дает не только выигрыш в КПД, но и в качестве выходного тока. Величина пульсаций тока от пика до пика сохраняется практически неизменной во всем диапазоне выходной мощности. В этом случае, отношение размаха пульсаций тока на выходе к его среднему значению увеличивается с понижением выходной мощности. Если в таком случае будут работать все преобразователи, величина пульсаций выходного тока будет недопустимо большой. Стоит отметить, что рассматривается худший случай, т.е. отсутствие смещения фаз пульсаций токов на выходах преобразователей. Некоторые производители

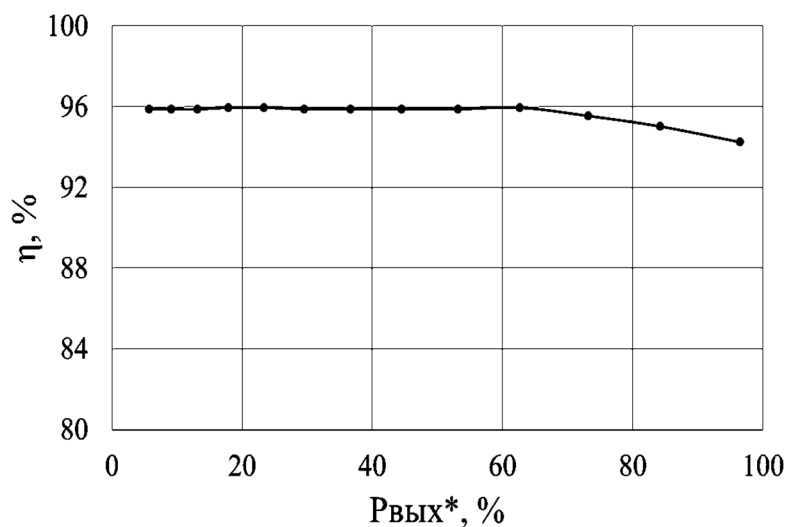


Рисунок 15 – КПД системы из 10 преобразователей с алгоритмом отключения ячеек

модульных выпрямителей для гальванических производств решают данную проблему с помощью увеличения индуктивности выходного фильтра, что ведет к увеличению его габаритов и массы, а также стоимости. При этом, в номинальном режиме работы системы электропитания пульсации тока на выходе составляют доли процента. Предложенный алгоритм позволяет не увеличивать индуктивность выходного фильтра и сохранить величину относительных пульсаций выходного тока в требуемых техпроцессом пределах.

На Рисунке 16, а) показано, как зависит отношение величины пульсаций тока на выходе одного преобразователя от приведенной выходной мощности. При внедрении ранее описанного алгоритма, эта зависимость примет следующий вид, показанный на Рисунке 16, б).

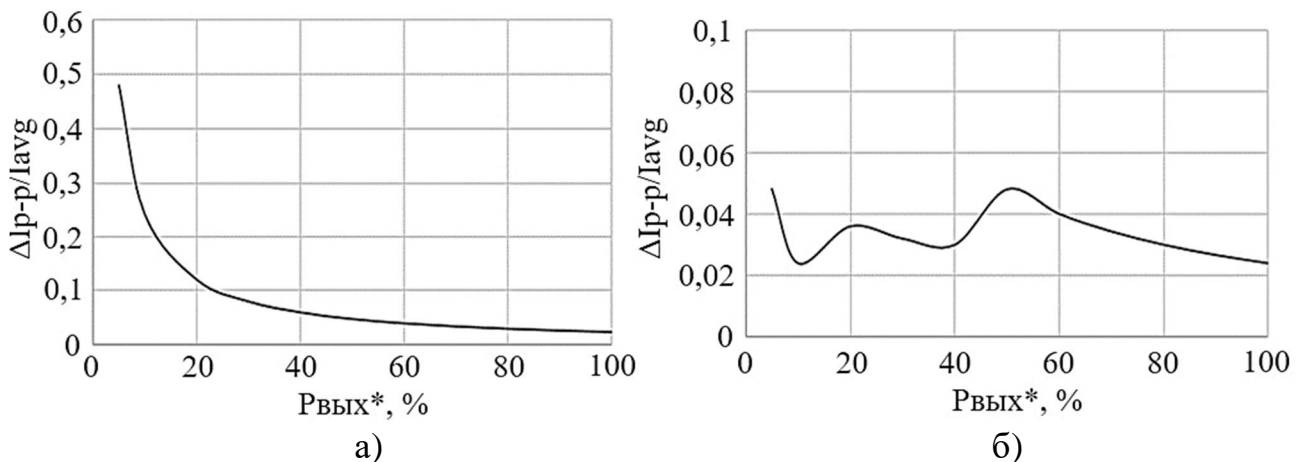


Рисунок 16 – Зависимость относительных пульсаций выходного тока от выходной мощности: а) при работе всех модулей системы б) – при использовании алгоритма отключения ячеек

**В заключении** приводятся основные выводы и результаты по диссертационной работе. **В приложении А** представлены справка и акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс НГТУ (г. Новосибирск) и в производственный процесс ООО «Интмаш» (г. Бердск). **В приложении Б** представлен листинг программы для комплексного расчета основных параметров преобразователя с фазовым управлением. **В приложении В** представлено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В ходе выполнения представленной диссертационной работы был разработан модуль электропитания, а также система электропитания для гальванической установки с улучшенными энергетическими характеристиками.

В процессе выполнения работы были решены все поставленные задачи.

1. Произведен анализ схем силовой части источника электропитания для гальванических производств с точки зрения уменьшения массы и габаритов изделия, а также анализ способов распределения токовой загрузки преобразователей в рамках системы с параллельным включением преобразователей напряжения. Обосновано решение использовать структуру из

параллельно включенных преобразователей напряжения с фазовым управлением для реализации модульной системы электропитания гальванической установки.

2. Предложена имитационная модель синтезированной системы электропитания, позволяющая получить её статические и динамические характеристики, и оценить адекватность предложенных способов управления.

3. Синтезирован алгоритм расчета параметров силовой цепи преобразователя с точки зрения минимизации массы источника электропитания, что в сочетании с алгоритмом отключения ячеек при малой выходной мощности дает возможность улучшить массогабаритные показатели системы электропитания гальванической установки на 13%.

4. Разработана программа комплексного расчета основных параметров преобразователя с фазовым управлением, предоставляющая возможность получить значения всех необходимых параметров силовой части преобразователя напряжения с фазовым управлением.

5. Реализован модуль источника электропитания для гальванических производств, обладающий близким к единице коэффициентом мощности и повышенным до 94% КПД при сопоставимых с аналогами массогабаритных показателях.

6. Разработана модернизированная система управления преобразователями напряжения, включенными параллельно, позволяющая устранить статическую ошибку в выходном напряжении после восстановления передачи данных между ячейками.

7. Предложен и реализован алгоритм управления системой электропитания, состоящей из параллельно включенных преобразователей напряжения, позволяющий улучшить качество выходной энергии в области малой выходной мощности без необходимости увеличения номиналов силовых элементов выходного фильтра. Предложенный алгоритм управления также позволил увеличить КПД системы электропитания до 95% в диапазоне нагрузки от 5 до 90% от номинальной.

8. Повышена точность распределения токов между ячейками до 12% с использованием управления по среднему току преобразователей с учетом 10% разброса показаний датчиков токов силовых ячеек.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:***

1. Классен С. В. Использование цифрового интерфейса связи CAN для обеспечения параллельной работы преобразователей / С. В. Классен, Т. С. Классен, С. В. Луфт, С. А. Харитонов, А. Г. Волков // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 102 – 108. – doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-102-108;

2. Луфт С. В. Способ устранения статической ошибки в выходном напряжении параллельно работающих преобразователей напряжения после переходных процессов / С. В. Луфт, Т. С. Классен, А. С. Мурашко, С. А. Харитонов // Электропитание. – 2021. – № 1. – С. 42 – 49.

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:*

3. Свидетельство № 2022612778. Программа расчета параметров схемы преобразователя напряжения с фазовым управлением / С.В. Луфт // Заявл. 09.02.2022; зарегистр. 28.02.2022. Заявитель и правообладатель Луфт С.В.

*Статьи в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus / WebOfScience:*

4. Luft, S. V. Experimental test results of the DC/DC converter prototype for electroplating installation / S. V. Luft // 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2017. – P. 443 – 445. – doi: 10.1109/EDM.2017.7981791.

5. Study of a Dual-Loop Subordinate Control System for a DC-DC Converter with Galvanic Isolation / S. V. Klassen, T. S. Klassen, D. A. Shtein, A. G. Volkov, R. Y. Dubkova, S. V. Luft // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2018. – P. 6403 – 6410. – doi: 10.1109/EDM.2018.8435034.

6. Луфт С. В. Синтез системы управления преобразователями, работающими параллельно на общую нагрузку / С. В. Луфт, Т. С. Классен, С. В. Классен // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018 : ТРУДЫ XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ: В 8 ТОМАХ, Новосибирск, 02–06 октября 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. – 2018. – С. 163 – 170.

7. Klassen S. V. Current Sharing in Digitally Controlled DC-DC Converters Connected in Parallel / S. V. Klassen, T. S. Klassen, S. V. Luft // 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2019. – P. 541 – 546. – doi: 10.1109/EDM.2019.8823233.

8. Luft S. V. Full-bridge phase-shifted converter design for aircraft rectifier unit / S. V. Luft, A. A. Khristolyubov // 2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2015. – P. 442 – 445. – doi: 10.1109/EDM.2015.7184580.

9. Synthesis of the control system for DC-DC converters for aircraft / A. A. Khristolyubov, T. S. Sekushenko, S. V. Luft, A. I. Khristolyubova, D. V. Makarov // 2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2015. – P. 547 – 552. – doi: 10.1109/EDM.2015.7184602.

10. Sinyushin A. V. Three-port bridge converter for stand-alone power system / A. V. Sinyushin, D. V. Makarov, A. L. Chupakhina, S. V. Luft // 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2017. – P. 584 – 589. – doi: 10.1109/EDM.2017.7981822.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84 1/16. Объем 1 п.л., тираж 100 экз.  
Заказ №952. Подписано в печать 25.04.2022 г.