

На правах рукописи



Дроздецкий Сергей Владимирович

**Разработка и исследование
повышающе-понижающего корректора коэффициента мощности
в различных режимах работы индуктивного накопителя**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Смоленск – 2021

Работа выполнена на кафедре электроники и микропроцессорной техники филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

Научный руководитель:

Якименко Игорь Владимирович
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроника и
микропроцессорная техника» филиала
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Официальные оппоненты:

Чивенков Александр Иванович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Теоретическая и общая
электротехника»
ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»

Соколов Александр Михайлович
доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры «Высоковольтной
электроэнергетики, электротехники и
электрофизики» ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Ведущая организация

ООО «ММП-Ирбис», г. Москва

Защита диссертации состоится « 25 » ноября 2021 г. в 14 : 00 на заседании диссертационного совета МЭИ.009 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус Е, ауд. Е-101А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Отзывы (в двух экземплярах, с подписями и заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МЭИ.009

к.т.н., доцент Воронин Игорь Павлович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время корректоры коэффициента мощности (ККМ) получили широкое распространение. Сферой их применения являются импульсные источники питания радиоэлектронной аппаратуры, зарядные устройства, сварочные аппараты, электропривод и т.д. Проектирование ККМ сводится к расчету параметров силового контура и синтезу оптимальной системы управления (СУ). Данная задача является нетривиальной по следующим причинам:

- входное напряжение ККМ изменяется от нуля до максимального напряжения сети;
- широкий диапазон действующего напряжения сети;
- пульсации мощности на входе ККМ и неустраняемые пульсации выходного напряжения в случае однофазной сети;
- входной ток ККМ должен изменяться по синусоидальному закону;
- вид передаточных характеристик ККМ как объекта управления зависит от многих параметров: конфигурации силового контура, паразитных сопротивлений, режима работы индуктивного накопителя, разновидности СУ и др.

Напряжение на выходе преобразователей переменного напряжения в постоянное часто должно быть ниже максимального входного. В этом случае применяются ККМ на основе повышающего регулятора с вторичным понижающим преобразователем. Недостатком данного решения является ухудшение КПД и увеличение массогабаритных показателей устройства, сложности и стоимости разработки. Применение повышающе-понижающих силовых контуров позволяет совместить функции ККМ и вторичного преобразователя. В отличие от ККМ на основе повышающего регулятора, повышающе-понижающие ККМ исследованы в меньшей степени, что ограничивает сферу их применения. Таким образом, разработка оптимальных методик проектирования повышающе-понижающих ККМ является актуальной задачей.

ККМ может работать в следующих режимах тока дросселя: непрерывном (РНТ), прерывистом (РПТ), граничном и псевдонепрерывном (псевдо-РНТ). Свойства силового контура и принципы построения СУ для каждого из режимов отличаются и обладают своими достоинствами и недостатками. В РНТ и псевдо-РНТ форма токов ключей имеет вид прямоугольной трапеции, для этих режимов характерна высокая эффективность использования полупроводниковых приборов. В РПТ токи имеют треугольную форму, поэтому эффективность использования ключей достаточно низкая. Сложность проектирования СУ ККМ в РНТ выше, чем в РПТ. Совмещение достоинств РНТ и РПТ является актуальной задачей. Псевдо-РНТ позволяет достичь компромисса между эффективностью использования ключей и сложностью СУ, но недостаточное количество исследований этого режима сдерживает его применение в практических разработках.

Степень разработанности темы исследования.

Существуют два основных подхода к представлению силового контура импульсного преобразователя в качестве объекта управления – непрерывный и дискретный.

В первом случае преобразователь представляется в виде усредненной на периоде коммутации непрерывной модели. После линеаризации непрерывной модели анализ и синтез СУ импульсного преобразователя производятся с помощью широко известных методов линейной теории автоматического управления (ТАУ). Этот подход раскрывается в трудах А.И. Коршунова, В.И. Мелешина, М.А. Амелиной, С.А. Амелина, R. Erickson, R. Middlebrook, S. Ben-Yaakov, S. Cuk, V. Vorperian и др. В целом, особенности построения непрерывных моделей различных регуляторов для РНТ и РПТ описаны в достаточной степени, при этом усредненные модели преобразователей для псевдо-РНТ практически отсутствуют.

Следующий подход к проектированию ключевых преобразователей основан на ТАУ для дискретных систем. Основоположниками этой теории являются А.А. Вавилов, В.В. Солодовников, Я.З. Цыпкин, E. Lee, E. Jury, I. Sandberg, M. Pai, R. Kalman и другие ученые. К сторонникам применения теории дискретных систем к импульсным преобразователям следует отнести Г.А. Белова, A. Prodic, D. Maksimovich, F. Lee, M. Al-Numay, P. Mattavelli, R. Iwens, S. Buso и др. Данный подход является достаточно трудоемким и получил ограниченное распространение в инженерной среде. Несмотря на большой объем проведенных на данный момент исследований, методы синтеза СУ импульсных преобразователей с использованием математического аппарата ТАУ для линейных систем по-прежнему актуальны.

Проблематике ККМ посвящены работы А.А. Малаханова, А.В. Лукина, А.В. Серебрянникова, А.И. Андриянова, Г.А. Белова, М.Ю. Кастрова, E. Ismail, J. Chen, K. Smedley, M. Jovanovich, R. Erickson и других ученых. Предложены различные методики проектирования повышающих ККМ, но не исследованы в достаточной мере особенности синтеза СУ повышающе-понижающих ККМ с учетом паразитных параметров силового контура и коэффициентов передачи сигналов в СУ. Кроме того, существует потребность в более простых алгоритмах управления и снижении трудоемкости проектирования ККМ.

Целью диссертационной работы является разработка, совершенствование и исследование усредненных на периоде коммутации моделей силового контура и алгоритмов управления ККМ, позволяющих уменьшить трудоемкость проектирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. проанализировать существующие топологии преобразователей переменного напряжения в постоянное, выявить возможности их улучшения;
2. усовершенствовать силовой контур повышающе-понижающего ККМ и упростить СУ;
3. разработать усредненную на периоде коммутации обобщенную модель силового контура повышающе-понижающего ККМ для режимов непрерывного,

прерывистого и псевдонепрерывного тока индуктивного накопителя, исследовать вопросы устойчивости обратной связи;

4. разработать и исследовать ключевые модели повышающе-понижающего ККМ, сравнить динамические свойства преобразователя в различных режимах работы индуктивного накопителя.

Объектом исследования являются возможности оптимизации силовых контуров и алгоритмов управления повышающе-понижающего ККМ.

Методы исследования: для решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей, методы припасовывания и усреднения в пространстве состояний, методы ТАУ для линейных систем, методы имитационного моделирования в MATLAB/Simulink, экспериментальные исследования на реальном макете.

Научная новизна:

1. Разработана и апробирована усредненная на периоде коммутации обобщенная модель повышающе-понижающего преобразователя для режимов непрерывного, прерывистого и псевдонепрерывного тока индуктивного накопителя, дополненная уравнением для входного тока и учитывающая влияние тока хранения на свойства преобразователя.

2. Предложен способ формирования входного тока повышающе-понижающего ККМ, отличающийся реализацией контура тока независимо от контура стабилизации выходного напряжения и позволяющий упростить СУ повышающе-понижающего ККМ за счет исключения перемножителя, формирующего уставку входного тока на основании сигналов входного напряжения и ошибки выходного напряжения.

3. Выведена в аналитическом виде передаточная характеристика «управление – выход» повышающе-понижающего преобразователя в псевдо-РНТ, позволяющая синтезировать звено коррекции СУ по выходному напряжению.

Практическая значимость работы:

1. Предложено новое схемотехническое решение силового контура повышающе-понижающего безмостового ККМ, которое имеет общую точку входного и выходного напряжения и содержит на один диод меньше по сравнению с силовым контуром ККМ на основе последовательно-параллельного преобразователя и диодного моста.

2. Предложено новое схемотехническое решение силового контура повышающе-понижающего безмостового ККМ, которое имеет общую точку входного и выходного напряжения и позволяет уменьшить пиковый ток ключей/диодов/дресселя за счет возможности перехода из РПТ в псевдо-РНТ.

3. Разработана компьютерная обобщенная непрерывная модель повышающе-понижающего преобразователя, учитывающая паразитные параметры реактивных элементов и коэффициенты передачи сигналов датчиков тока и напряжения в СУ, которая позволяет синтезировать передаточные функции звеньев коррекции обратной связи и уменьшить трудоемкость проектирования ККМ.

4. Разработаны компьютерные ключевые модели повышающе-понижающего КKM с замкнутой СУ для РНТ, РПТ и псевдо-РНТ, позволяющие исследовать поведение преобразователя в стационарном режиме и при переходных процессах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усредненная на периоде коммутации обобщенная модель повышающе-понижающего преобразователя для РНТ, РПТ и псевдо-РНТ.

2. Способ формирования входного тока повышающе-понижающего КKM без использования перемножителя.

3. Новое схемотехническое решение силового контура повышающе-понижающего КKM с общей точкой входного и выходного напряжения, простой одноконтурной СУ и прерывистым током дросселя.

4. Новое схемотехническое решение силового контура повышающе-понижающего КKM с общей точкой входного и выходного напряжения, упрощенной двухконтурной СУ и псевдонепрерывным током дросселя.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением выведенных математических выражений с результатами имитационного моделирования и реального макетирования, практическим внедрением, сравнением с результатами, полученными другими авторами.

Внедрение результатов работы: результаты исследований использовались при выполнении опытно-конструкторской работы «Разработка и изготовление блока питания бортовых нагрузок для БПЛА». Предложенное автором решение выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности внедрено в энергетической установке беспилотного летательного аппарата «Мерлин-21Б», выпускаемого АО «НИИ СТТ».

Апробация полученных результатов: основные результаты работы докладывались на следующих мероприятиях:

- XIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика: микроэлектроника и оптотехника, инновационные технологии и оборудование в промышленности, управление инновациями», г. Смоленск, 2016.

- XIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика», г. Смоленск, 2017.

- VIII Международная научно-техническая конференция «Энергетика, информатика, инновации – 2018», г. Смоленск, 2018.

- IX Международная научно-техническая конференция «Энергетика, информатика, инновации», г. Смоленск, 2019.

- X Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Энергетика, информатика, инновации – 2020», г. Смоленск, 2020.

- XXXIV международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-34», г. Санкт-Петербург, 2021.

Публикации: основное содержание диссертации отражено в 14 печатных трудах, из них 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 3 патента на изобретения, 6 статей и тезисов конференций.

Личный вклад автора состоит в разработке алгоритмов управления ККМ, построении обобщенной непрерывной модели преобразователя для РНТ, РПТ и псевдо-РНТ, исследовании частотных характеристик силовых контуров, проектировании экспериментального образца.

Структура и объем работы: диссертация изложена на 156 страницах, имеет 71 иллюстрацию, включает титульный лист, оглавление, введение, 3 основных главы результатов работы, заключение, список использованных источников (106 позиций) и 3 приложения на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, отмечен вклад отечественных и зарубежных ученых по теме диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая ценность, перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту, а также приведена структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены силовые контуры и системы управления (СУ) корректоров коэффициента мощности (ККМ). В импульсных источниках питания радиоэлектронной аппаратуры широкое распространение получил однофазный ККМ на основе повышающего регулятора, дроссель которого работает в режиме непрерывных токов (РНТ) индуктивного накопителя. Этот преобразователь содержит мостовой выпрямитель, поэтому сеть и нагрузка не имеют общей точки входного и выходного напряжения, что приводит к усложнению конструкции сетевого помехоподавляющего фильтра. Также недостатками повышающего ККМ являются невозможность работы при выходном напряжении ниже максимального входного и отсутствие защиты по току. Обзор публикаций показывает, что разработка силового контура повышающе-понижающего ККМ с общей точкой входа и выхода, а также с защитой от перегрузки по току является актуальной задачей.

Автором предложена модификация силового контура ККМ на основе последовательно-параллельного преобразователя с целью уменьшения количества полупроводниковых ключей и добавления общей точки входного и выходного напряжений. Предлагаемое решение показано на рис. 1.

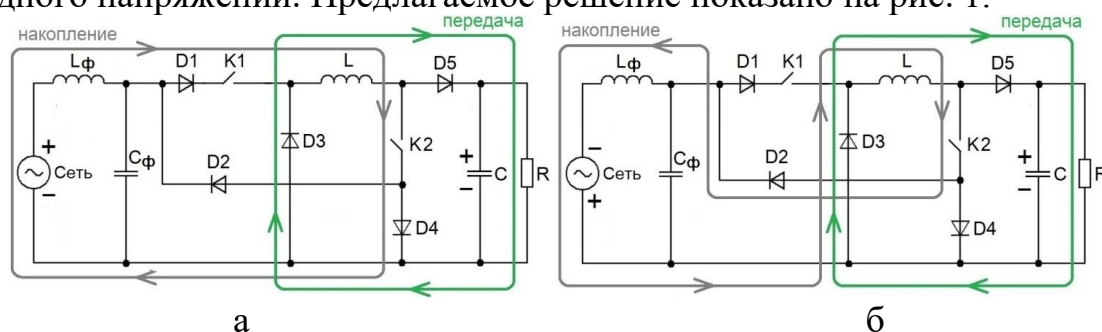


Рисунок 1 – Повышающе-понижающий безмостовой ККМ

а – накопление и передача энергии при положительной полярности сети

б – накопление и передача энергии при отрицательной полярности сети

При положительной полярности входного напряжения ключи K1 и K2 коммутируются синхронно, силовой контур работает аналогично

последовательно-параллельному регулятору (рис. 1, а). При отрицательной полярности на входе диод D1 заперт, состояние ключа K1 безразлично, силовой контур работает аналогично инвертирующему преобразователю (рис. 1, б). Переключение силовых контуров в зависимости от полярности не требуется, один и тот же сигнал управления подается на все ключи. Недостатками предложенного решения по сравнению с исходным ККМ на основе последовательно-параллельного преобразователя являются повышенное напряжение на одном из ключей и более сложное управление этим ключом из-за «плавающего» потенциала на одном из силовых выводов.

В первой главе получены усредненные на интервале коммутации уравнения напряжения на дросселе и тока конденсатора для РНТ и РПТ:

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di_L}{dt} \Big|_{CP} = d_1 \cdot u_{BX} - d_2 \cdot u_C \\ C \cdot \frac{du_C}{dt} \Big|_{CP} = i_{L_CP} \cdot \frac{d_2}{d_1 + d_2} - \frac{u_C}{R} \end{cases},$$

где d_1 и d_2 – относительные длительности интервала импульса и паузы соответственно, u_{BX} и u_C – входное напряжение и напряжение на конденсаторе соответственно, i_L – ток дросселя. В РПТ при переменном входном напряжении коэффициент заполнения интервала импульса d_1 будет величиной постоянной, а коэффициент заполнения интервала паузы d_2 – величиной переменной.

Варианты реализации СУ ККМ для РНТ и РПТ приведены на рис. 2, где $U_{уст}$ – уставка выходного напряжения ККМ, ГЛИН – генератор линейно изменяющегося напряжения, K_X – коэффициент передачи управляемой переменной x в СУ, $K_{ВХ}$ и $K_{ВЫХ}$ – коэффициенты передачи в СУ входного и выходного напряжений соответственно.

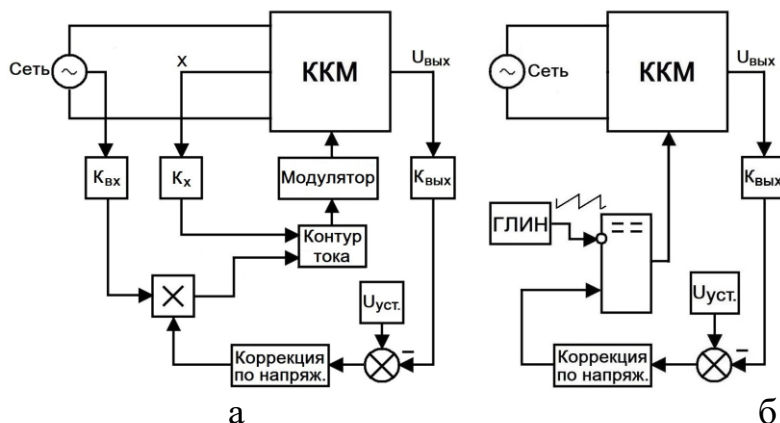


Рисунок 2 – СУ ККМ в различных режимах тока дросселя:

а – обобщенная двухконтурная СУ для РНТ, б – одноконтурная СУ для РПТ

Классические СУ ККМ для РНТ (рис. 2, а) являются системами подчиненного регулирования с двумя контурами обратной связи: медленный контур стабилизирует выходное напряжение, быстрый контур формирует синусоидальный входной ток. Сигнал с выхода контура тока поступает на импульсный модулятор, который в зависимости от типа СУ может формировать широтно-импульсную, частотно-импульсную или релейную модуляцию. Свойства различных СУ ККМ в РНТ сведены в табл. 1.

Входной ток повышающе-понижающих ККМ в РПТ повторяет форму напряжения сети за счет свойств силового контура. В этом случае обратная связь по току не требуется, для управления ККМ достаточно простой одноконтурной СУ по выходному напряжению (рис. 2, б). Недостатком данного решения являются большие пульсации тока индуктивного накопителя и полупроводниковых ключей. Построение преобразователя, совмещающего в себе низкие пульсации тока дросселя и простую систему управления, представляет научный и практический интерес.

Таблица 1 Сравнение свойств систем управления ККМ в РНТ

	СУ по среднему току	СУ по пиковому току	Релейная СУ	СУ с упрощенным контуром тока	СУ по напряжению
Наличие перемножителя	да	да	да	нет	да
Частота коммутации	постоянная	постоянная, переменная	переменная	постоянная	переменная
Коррекция контура тока	да	нет	нет	нет	нет
Необходимые датчики	Входное и выходное напряжение, входной ток	Входное и выходное напряжение, входной ток (ток ключа)	Входное и выходное напряжение, входной ток	Входное напряжение, входной ток (ток ключа)	Входное и выходное напряжение, напряжение на дросселе или конденсаторе
Пульсации входного тока	Низкие	Высокие	Низкие	Низкие	Низкие

Во второй главе показано, что режим псевдонепрерывного тока дросселя (псевдо-РНТ) является общим случаем для всех остальных вариантов – граничного режима, РНТ и РПТ. Как видно из рис. 3, при нулевой длительности интервала хранения псевдо-РНТ вырождается в РНТ, при нулевом токе хранения – в РПТ.

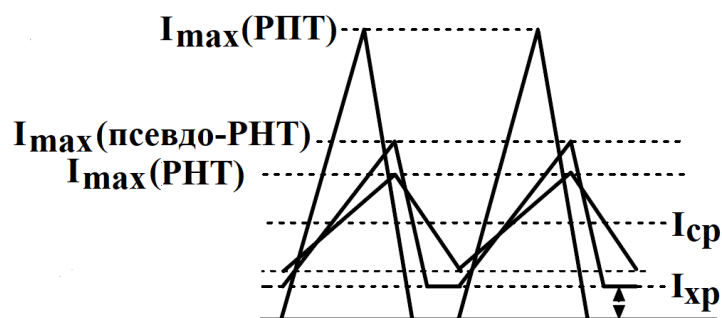


Рисунок 3 – Ток дросселя в различных режимах работы преобразователя

Особенности режима псевдонепрерывного тока индуктивного накопителя:

- форма токов ключей и диодов имеет вид прямоугольной трапеции, что позволяет добиться высокой эффективности использования полупроводниковых приборов;
- в псевдо-РНТ пиковый ток ключей и диодов выше, чем в РНТ, но ниже, чем в РПТ;

- невысокий КПД из-за рассеяния мощности на паразитных сопротивлениях при хранении энергии в индуктивном накопителе;
- «жесткое» переключение полупроводниковых приборов и высокие динамические потери.

Свойства повышающе-понижающих ККМ в различных режимах приведены в таблице 2.

Таблица 2 Сравнение параметров повышающе-понижающего ККМ в различных режимах работы индуктивного накопителя

	РНТ	РПТ	Псевдо-РНТ
Индуктивность дросселя	большая	малая	малая
Емкость С-фильтра	большая		
Максимальный ток дросселя	низкий	высокий	средний
Входная ВАХ	нелинейная	линейная	определяется законом модуляции тока хранения
Сложность проектирования ККМ	высокая	низкая	средняя

При добавлении в предложенный ранее безмостовой ККМ (рис. 1) ключа с односторонней проводимостью силовой контур получает возможность работы в псевдо-РНТ. Безмостовой ККМ с двумя вариантами установки шунтирующего ключа К3 приведен на рис. 4. Для обеспечения односторонней проводимости ключа последовательно с ним устанавливается диод D5.

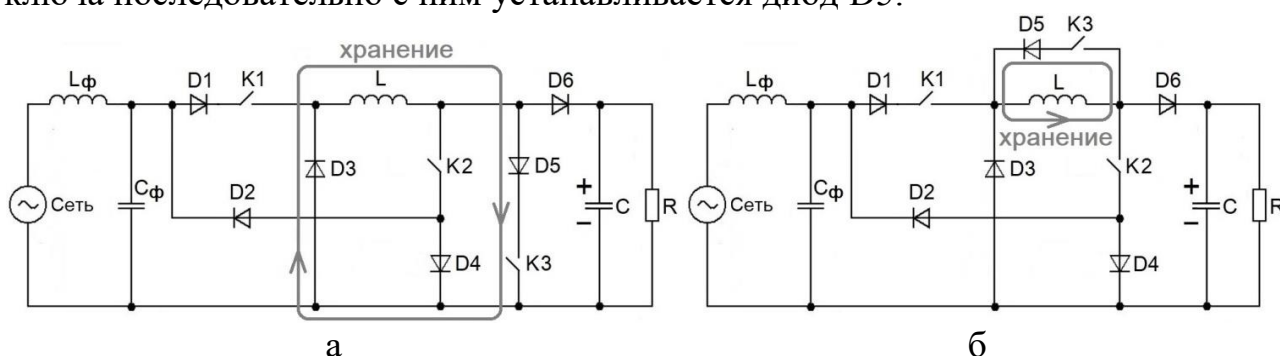


Рисунок 4 – Безмостовой повышающе-понижающий ККМ с возможностью работы в псевдо-РНТ:

а – с ключом нижнего уровня, б – с ключом верхнего уровня

Реализация драйвера в случае использования шунтирующего ключа нижнего уровня (рис. 4, а) проще по сравнению с драйвером ключа верхнего уровня (рис. 4, б). Но, с точки зрения КПД, вариант с «плавающим потенциалом» для безмостового силового контура более предпочтителен, т.к. в этом случае исключаются потери на диоде D3. Временные диаграммы безмостового ККМ в псевдо-РНТ показаны на рис. 5. Изменения токов при переходе к следующему такту показаны для наглядности, на практике частота коммутации на несколько порядков больше частоты сети, а приращение токов при переходе к следующему такту стремится к нулю.

Во второй главе производится построение непрерывных моделей преобразователей с гальванической развязкой и непосредственной связью.

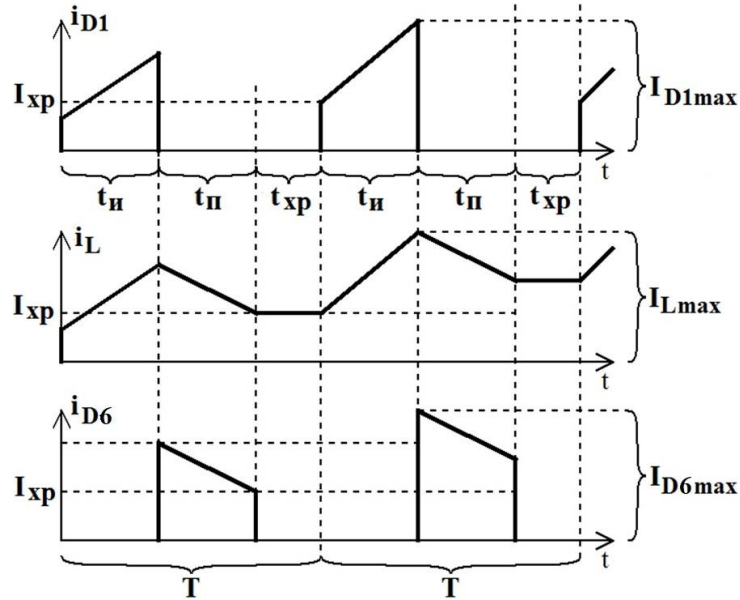


Рисунок 5 – Токи диода D1, дросселя L и диода D6 безмостового ККМ в псевдо-РНТ на положительном полупериоде входного напряжения

Обобщенная непрерывная система уравнений для повышающе-понижающего преобразователя имеет следующий вид:

$$\begin{cases} d_1 \cdot u_{BX} = L \cdot \frac{di_L}{dt} + d_2 \cdot u_C \\ i_{BX} = i_{L_XP} \cdot d_1 + (i_L - i_{L_XP}) \cdot \frac{d_1}{d_1 + d_2} \\ i_{L_XP} \cdot d_2 + (i_L - i_{L_XP}) \cdot \frac{d_2}{d_1 + d_2} = C \cdot \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R} \end{cases}, \quad (1)$$

где d_1 и d_2 – коэффициенты заполнения импульса и паузы соответственно, u_{BX} – входное напряжение, L – индуктивность дросселя, i_L – ток дросселя, u_C – напряжение на конденсаторе, i_{BX} – входной ток преобразователя, i_{L_XP} – ток хранения, C – емкость конденсатора. Все уравнения системы (1) подходят для четырех режимов работы индуктивного накопителя повышающе-понижающего регулятора – РНТ, РПТ, псевдо-РНТ, граничного режима. Исключение коэффициента заполнения паузы d_2 из усредненных уравнений производится по выражениям из системы (2):

$$\begin{cases} d_2 = 1 - d_1 & \text{РНТ} \\ d_2 = \frac{2 \cdot L}{T} \cdot \frac{i_L}{u_{BX} \cdot d_1} - d_1 & \text{РПТ} \\ d_2 = \frac{2 \cdot L}{T} \cdot \frac{(i_L - i_{L_XP})}{u_{BX} \cdot d_1} - d_1 & \text{псевдо-РНТ} \end{cases}, \quad (2)$$

где T – период коммутации. В псевдо-РНТ длительности интервалов импульса, паузы и хранения определяются системой управления. Это означает, что изменение закона модуляции тока хранения позволяет влиять на свойства преобразователя.

Принцип работы обратноходового преобразователя с гальванической развязкой (рис. 6) аналогичен принципу работы предложенного выше повышающе-понижающего регулятора с непосредственной связью.

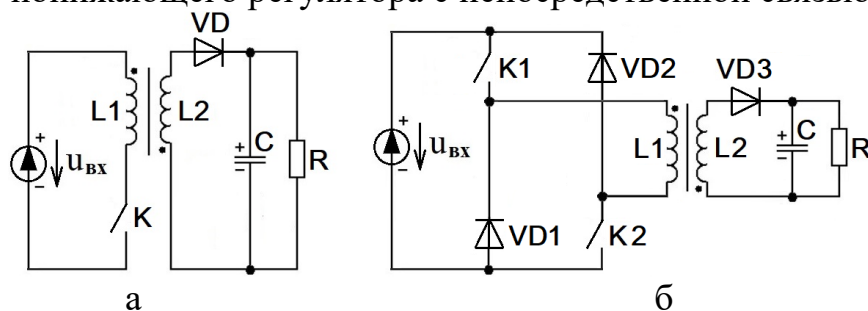


Рисунок 6 – Варианты реализации обратноходового преобразователя: одноключевой (а) и двухключевой (б)

Для упрощения анализа трансформатор обратноходового преобразователя целесообразно представить идеальным трансформатором напряжения и индуктивностью намагничивания L_M , подключенной параллельно первичной обмотке. На рис. 7 показаны состояния силовых контуров на интервале импульса.

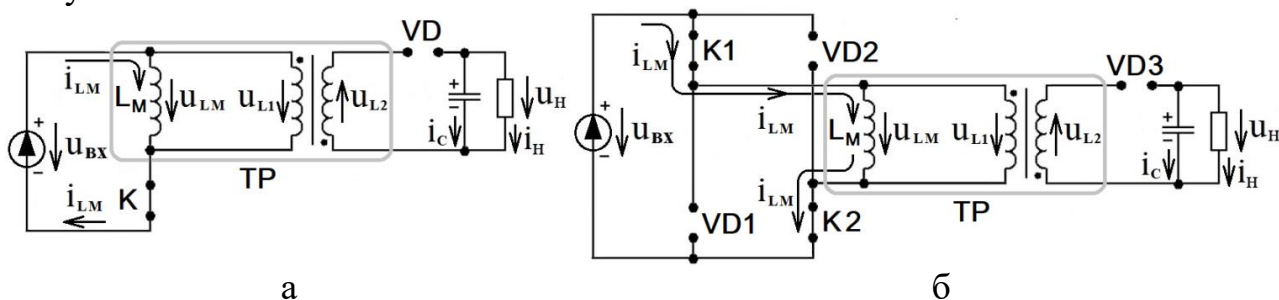


Рисунок 7 – Токи и напряжения на интервале импульса в одноключевом (а) и двухключевом (б) преобразователях

Процессы накопления и передачи энергии в обратноходовых топологиях разнесены во времени, преобразователи смогут работать в псевдо-РНТ при наличии ключа, шунтирующего индуктивный накопитель по сигналу системы управления. На рис. 8 показаны состояния обратноходовых топологий на интервале хранения.

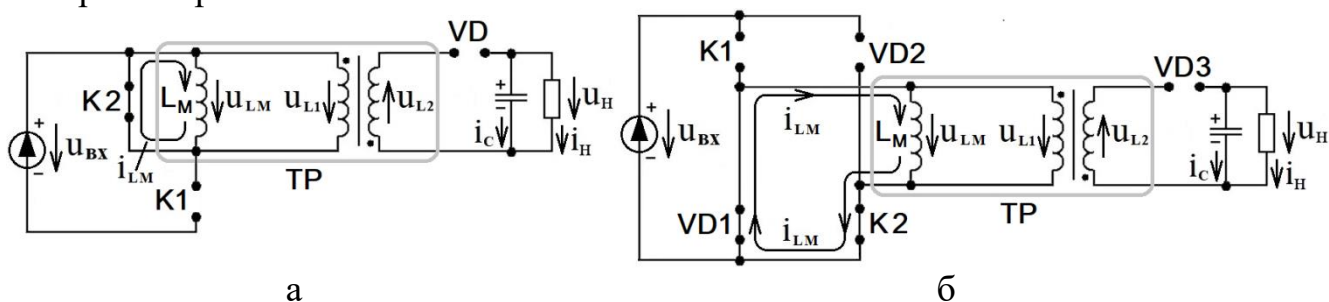


Рисунок 8 – Токи и напряжения на интервале хранения в обратноходовых преобразователях: а – модернизированный преобразователь на основе одноключевого преобразователя, б – «косой мост»

Обобщенная непрерывная система уравнений для обратноходового преобразователя имеет следующий вид:

$$\begin{cases} d_1 \cdot u_{BX} = L \cdot \frac{di_L}{dt} + d_2 \cdot K_{TP} \cdot u_C \\ i_{BX} = d_1 \cdot i_{L_M_XP} + (i_{L_M_CP} - i_{L_M_XP}) \cdot \frac{d_1}{d_1 + d_2} \\ \left(i_{L_M_XP} + (i_{L_M_CP} - i_{L_M_XP}) \cdot \frac{1}{d_1 + d_2} \right) \cdot d_2 \cdot K_{TP} = C \cdot \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R} \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) является общим случаем универсальной системы уравнений для повышающе-понижающего преобразователя в РНТ, РПТ, псевдо-РНТ и граничном режиме (1). Обобщенная система уравнений для коэффициента заполнения паузы обратногоходового преобразователя в различных режимах имеет вид:

$$\begin{cases} d_2 = 1 - d_1 & \text{РНТ} \\ d_2 = \frac{2 \cdot L_M \cdot i_{L_M} - T \cdot u_{BX} \cdot d_1^2}{T \cdot u_{BX} \cdot d_1} & \text{РПТ} \\ d_2 = \frac{2 \cdot L_M \cdot (i_{L_M} - i_{L_M_XP}) - T \cdot u_{BX} \cdot d_1^2}{T \cdot u_{BX} \cdot d_1} & \text{псевдо-РНТ} \end{cases} \quad (4)$$

Как видно из сравнения системы для обратногоходового преобразователя (4) с системой для повышающе-понижающего регулятора (2), коэффициент заполнения паузы для преобразователей с непосредственной и гальванической связью определяется практически одинаковыми соотношениями. Система уравнений (3) с учетом выражений (4) представляет собой универсальную обобщенную непрерывную нелинейную модель преобразователей обратногоходового принципа действия с непосредственной и гальванической связью. Эта модель подходит для следующих видов преобразователей: инвертирующего, последовательно-параллельного, безмостового повышающе-понижающего (рис. 1), безмостового повышающе-понижающего с возможностью работы в псевдо-РНТ (рис. 4), одноключевого обратногоходового (рис. 6, а), двухключевого обратногоходового (рис. 6, б) и др. Предложенная универсальная модель подходит для всех режимов работы индуктивного накопителя – РНТ, РПТ, псевдо-РНТ и граничного режима.

Входной ток повышающе-понижающего ККМ в псевдо-РНТ:

$$i_{BX} = d_1 \cdot \left(i_{L_XP} + u_{BX} \cdot \frac{d_1 \cdot T}{2 \cdot L} \right) \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), закон модуляции тока хранения влияет на свойства преобразователя. Пусть ток хранения пропорционален выпрямленному входному напряжению на коэффициент модуляции K , а контур стабилизации выходного напряжения аналогичен контуру напряжения для РПТ (рис. 2, б). Тогда регулировочная и входная вольт-амперная характеристики примут вид:

$$\begin{cases} \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ_Д}} = \sqrt{D_1 \cdot R \cdot K + D_1^2 \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot L}} \\ D_1 = \frac{-L \cdot K \cdot U_{ВХ_Д} + \sqrt{L^2 \cdot K^2 \cdot U_{ВХ_Д}^2 + \frac{2 \cdot L \cdot T \cdot U_{ВЫХ}^2}{R}}}{U_{ВХ_Д} \cdot T} \\ i_{ХР} = u_{ВХ} \cdot K \\ i_{ВХ} = u_{ВХ} \cdot D_1 \cdot \left(K + \frac{D_1 \cdot T}{2 \cdot L} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Входной ток при данном законе модуляции тока хранения будет линейно зависеть от напряжения на входе, поэтому преобразователь можно использовать в качестве ККМ. СУ, реализующая закон модуляции (6), приведена на рис. 9. Возможны и другие алгоритмы модуляции тока хранения, например, ток хранения может модулироваться током нагрузки.

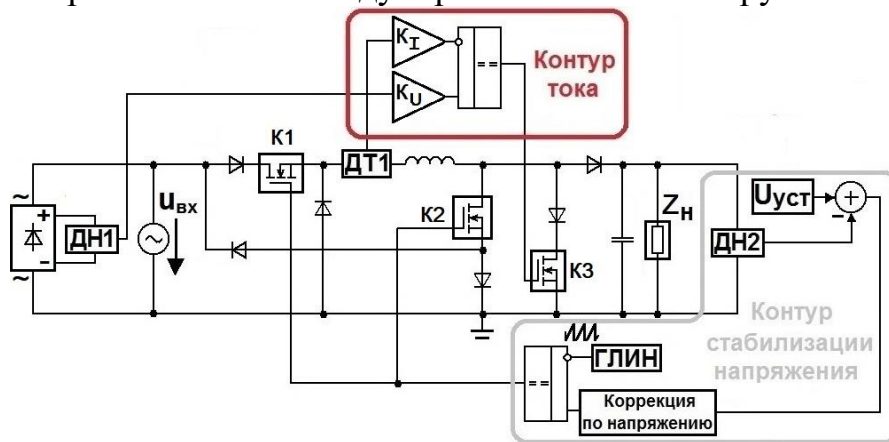


Рисунок 9 – СУ повышающе-понижающего безмостового ККМ в псевдо-РНТ с модуляцией тока хранения входным напряжением

Схема содержит датчики входного и выходного напряжений (ДН1, ДН2 соответственно) и тока дросселя (ДТ1). В отличие от двухконтурных СУ ККМ (рис. 2, а), СУ ККМ для псевдо-РНТ не содержит перемножитель. Выходной сигнал компаратора контура напряжения управляет ключами К1 и К2 преобразователя. Выходной сигнал компаратора контура тока управляет ключом К3: компаратор сравнивает ток дросселя с сигналом, пропорциональным выпрямленному входному напряжению. Когда ток дросселя становится меньше уставки тока хранения, отпирается ключ К3 и дроссель перестает отдавать энергию в нагрузку. Контур тока хранения в такой реализации не имеет проблем с устойчивостью, что упрощает синтез СУ. Контура тока и напряжения работают параллельно, в отличие от классических двухконтурных СУ подчиненного регулирования.

В третьей главе проводится апробация обобщенной непрерывной модели и синтезируются СУ для повышающе-понижающего ККМ, работающего в РНТ, РПТ и псевдо-РНТ. Получены аналитически и проверены с помощью модели в MATLAB/Simulink различные передаточные функции (ПФ) повышающе-понижающего преобразователя в различных режимах работы дросселя. ПФ «коэффициент заполнения – выходное напряжение» в РНТ с учетом ЭПС

конденсатора фильтра (R_{ESR}) и активного сопротивления дросселя (R_{DCR}) имеет следующий вид:

$$\frac{\tilde{u}_{BbIX}}{\tilde{d}} = \frac{\left(-\frac{L \cdot U_{BbIX}}{R \cdot (1-D)^3} \cdot s + \frac{U_{BX}}{(1-D)^2} \right) \cdot (1 + R_{ESR} \cdot C \cdot s)}{\frac{(R + R_{ESR}) \cdot L \cdot C}{(1-D)^2 R + R_{DCR}} s^2 + \frac{L + (R + R_{ESR}) \cdot R_{DCR} \cdot C + (1-D)^2 \cdot R \cdot R_{ESR} \cdot C}{(1-D)^2 R + R_{DCR}} s + 1}, \quad (7)$$

где стационарные составляющие обозначены прописными буквами, малые возмущения от установившегося режима – строчными буквами с волной.

ПФ «коэффициент заполнения – ток дросселя» в РНТ:

$$\frac{\tilde{i}_L}{\tilde{d}} = \frac{\frac{U_{BX} \cdot C}{(1-D)^3} \cdot s + \frac{U_{BX} \cdot (1+D)}{R \cdot (1-D)^3}}{\frac{(R + R_{ESR}) \cdot L \cdot C}{(1-D)^2 \cdot R + R_{DCR}} s^2 + \frac{L + (R + R_{ESR}) \cdot R_{DCR} \cdot C + (1-D)^2 \cdot R \cdot R_{ESR} \cdot C}{(1-D)^2 \cdot R + R_{DCR}} \cdot s + 1} \quad (8)$$

ПФ «ток дросселя – выходное напряжение» в РНТ:

$$\frac{\tilde{u}_{BbIX}}{\tilde{i}_L} = \frac{R \cdot (1-D) \cdot (1 + R_{ESR} \cdot C \cdot s)}{1 + R \cdot C \cdot s} \quad (9)$$

ПФ «коэффициент заполнения – входной ток» с учетом паразитных сопротивлений в РНТ примет вид:

$$\frac{\tilde{i}_{BX}}{\tilde{d}} = \frac{\frac{U_{BbIX} \cdot L \cdot C}{R \cdot (1-D)^3} \cdot s^2 + \frac{U_{BbIX} \cdot (1-D) \cdot C \cdot R^2 + U_{BbIX} \cdot L}{R^2 \cdot (1-D)^3} \cdot s + \frac{2 \cdot U_{BbIX}}{R \cdot (1-D)^2}}{\frac{(R + R_{ESR}) \cdot L \cdot C}{(1-D)^2 \cdot R + R_{DCR}} s^2 + \frac{L + (R + R_{ESR}) \cdot R_{DCR} \cdot C + (1-D)^2 \cdot R \cdot R_{ESR} \cdot C}{(1-D)^2 \cdot R + R_{DCR}} \cdot s + 1} \quad (10)$$

ПФ «входной ток – выходное напряжение» в РНТ:

$$\frac{\tilde{u}_{BbIX}}{\tilde{i}_{BX}} = \frac{R \cdot U_{BX}}{U_{BbIX}} \cdot \frac{(1 + R_{ESR} \cdot C \cdot s)}{(1 + R \cdot C \cdot s)} \quad (11)$$

Соотношение (7) используется при синтезе СУ по выходному напряжению, ПФ (8) и (9) – при синтезе СУ по среднему току дросселя. Выражение (11) требуется при синтезе СУ по пиковому току ключа, ПФ (10) и (11) необходимы при синтезе двухконтурной СУ повышающе-понижающего ККМ.

ПФ «коэффициент заполнения – выходное напряжение» в РПТ:

$$\frac{\tilde{u}_{BbIX}}{\tilde{d}_1} = \frac{\left(-\frac{U_{BbIX} \cdot T}{2} \cdot s + \frac{U_{BbIX}}{D_1} \right) \cdot (1 + R_{ESR} \cdot C \cdot s)}{\frac{L \cdot C \cdot U_{BbIX}}{2 \cdot D_1 \cdot U_{BX}} \cdot s^2 + \left(\frac{R \cdot C}{2} + \frac{L \cdot U_{BbIX}}{2 \cdot D_1 \cdot U_{BX} \cdot R} \right) \cdot s + 1} \quad (12)$$

Логарифмические частотные характеристики ПФ «управление – выход» для РНТ, РПТ и псевдо-РНТ приведены на рис. 10. Положение нулей и полюсов на ЛЧХ для РПТ и псевдо-РНТ полностью совпадает, при этом ЛАЧХ для псевдо-РНТ расположена на 5 дБ ниже ЛАЧХ для РПТ. В работе показано, что корректирующее звено, синтезированное для РПТ, обеспечивает устойчивую работу преобразователя и в псевдо-РНТ.

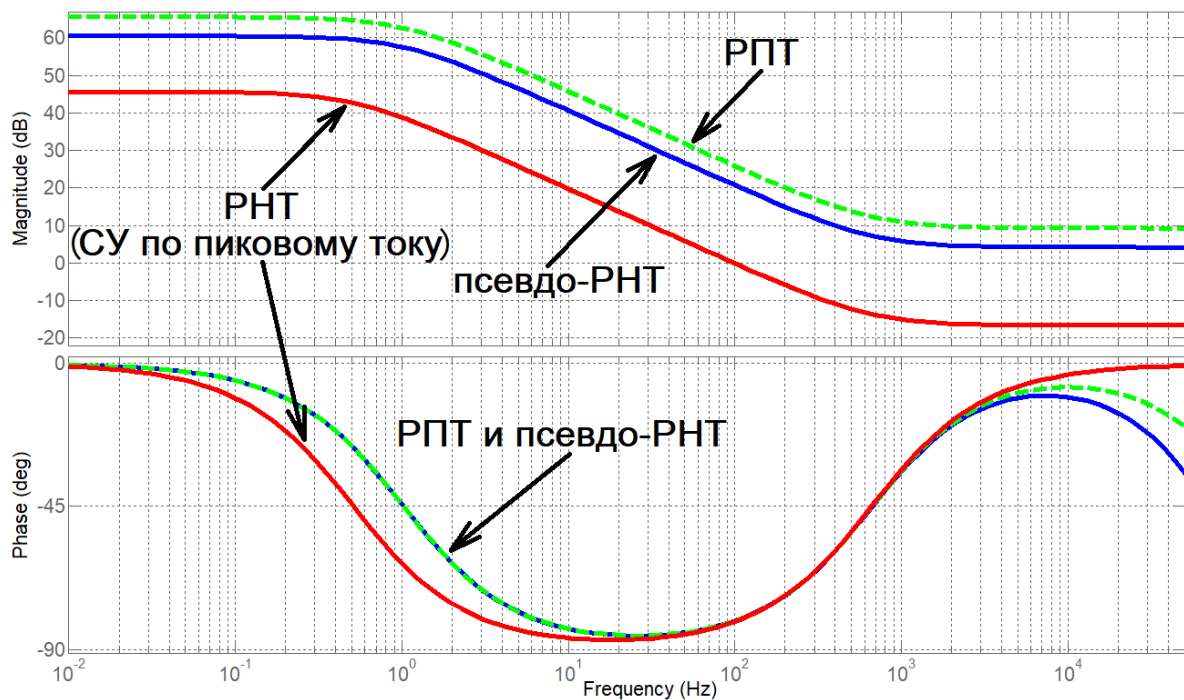


Рисунок 10 – ЛАЧХ и ЛФЧХ ПФ «управление-выход» повышающе-понижающего преобразователя в РНТ, РПТ и псевдо-РНТ

Ключевая модель безмостового ККМ в псевдо-РНТ с модуляцией тока хранения входным напряжением показана на рис. 11. На рис. 12 приведены осциллограммы тока дросселя безмостового ККМ для двух стационарных режимов. Преобразователь работает устойчиво в заданном диапазоне входного напряжения и выходной мощности. Динамические свойства ККМ в РНТ, РПТ и псевдо-РНТ практически совпадают.

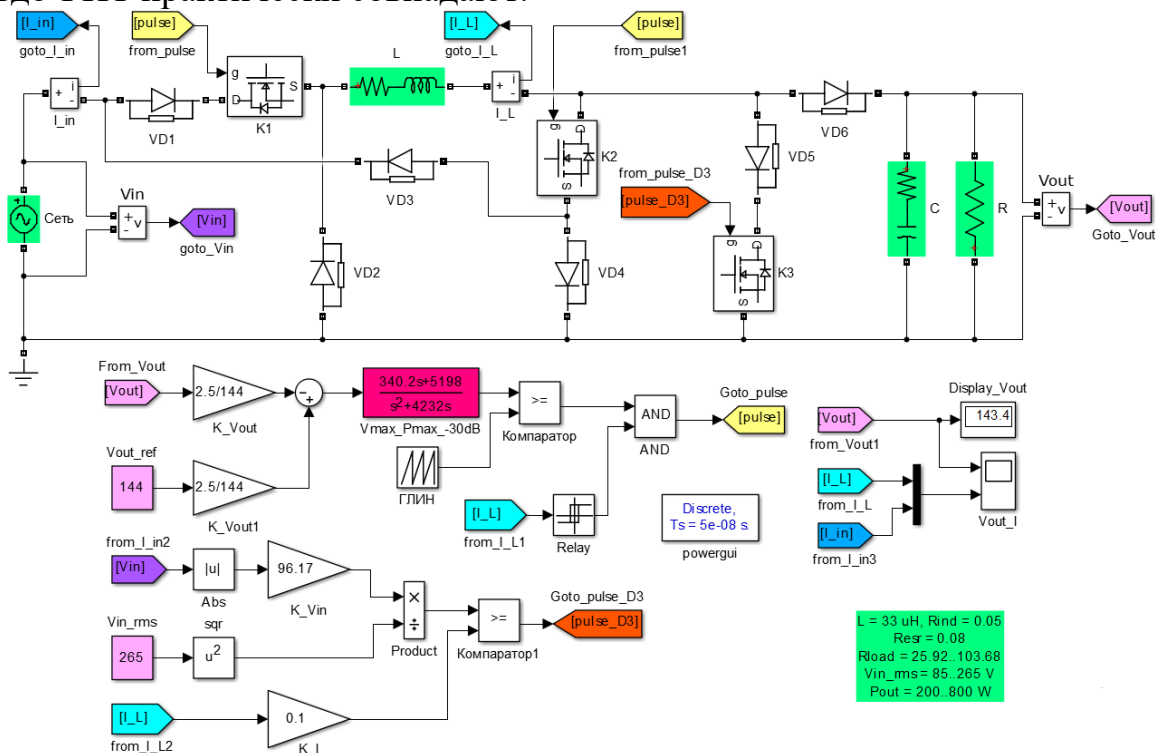


Рисунок 11 – Ключевая модель повышающе-понижающего безмостового ККМ в псевдо-РНТ с модуляцией тока хранения входным напряжением

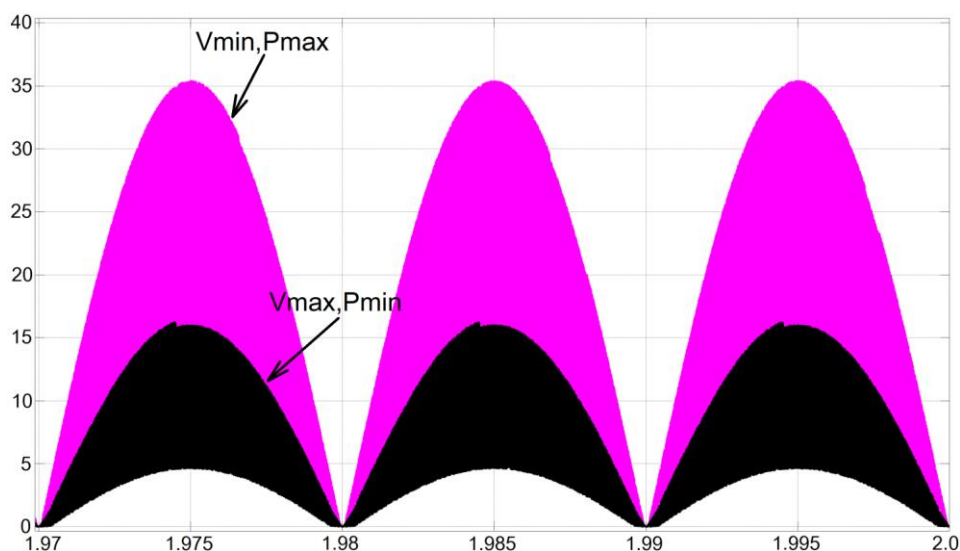


Рисунок 12 – Ток дросселя безмостового ККМ в стационарном режиме (СУ с модуляцией тока хранения входным напряжением, псевдо-РНТ)

В табл. 3 приведены пиковые значения тока дросселя повышающе-понижающего ККМ в различных режимах работы. Полученные данные свидетельствуют, что использование режима псевдонепрерывных токов вместо РПТ позволяет снизить максимальный ток дросселя/ключа/диода на 20-40%. Уменьшение пикового тока при переходе от РПТ к псевдо-РНТ в процентном соотношении указано в столбце «Максимальный ток дросселя» для псевдо-РНТ в скобках.

Таблица 3 Пиковые значения тока дросселя повышающе-понижающего ККМ в различных режимах работы

Режим работы	РНТ $L = 270 \text{ мкГн}$	РПТ $L = 10 \text{ мкГн}$	Псевдо-РНТ $L = 33 \text{ мкГн}$ $K_{ВХ} = 96.17$	
	Максимальный ток дросселя	Максимальный ток дросселя	Максимальный ток дросселя	Максимальный ток хранения
$U_{ВХ} \text{ rms} = 85 \text{ В},$ $P = 200 \text{ Вт}$	8.6	28.3	22.6 (-20.1%)	16.0
$U_{ВХ} \text{ rms} = 85 \text{ В},$ $P = 800 \text{ Вт}$	25.6	56.6	35.4 (-37.5%)	
$U_{ВХ} \text{ rms} = 265 \text{ В}, P = 200 \text{ Вт}$	5.7	28.3	17.0 (-39.9%)	5.1
$U_{ВХ} \text{ rms} = 265 \text{ В}, P = 800 \text{ Вт}$	16.1	56.6	32.1 (-43.3%)	

На рис. 13 показан стенд для испытаний экспериментального образца в псевдо-РНТ. Режим работы преобразователя: входное напряжение 20 В, выходное напряжение 19.94 В, ток нагрузки 2 А, частота коммутации 53 кГц, индуктивность дросселя 16.6 мкГн, DCR дросселя 0.015 Ом, **КПД 86.3%**. На рис. 14 приведены осциллограммы тока дросселя и переменной составляющей выходного напряжения в псевдо-РНТ. Экспериментальные исследования на реальном макете подтвердили уменьшение пикового тока ключа/дросселя при переходе из РПТ в псевдо-РНТ. Уменьшение КПД при переходе из РПТ в псевдо-РНТ составляет около 1-2 % и практически полностью нивелируется при тщательной настройке контура тока и снижении динамических потерь.

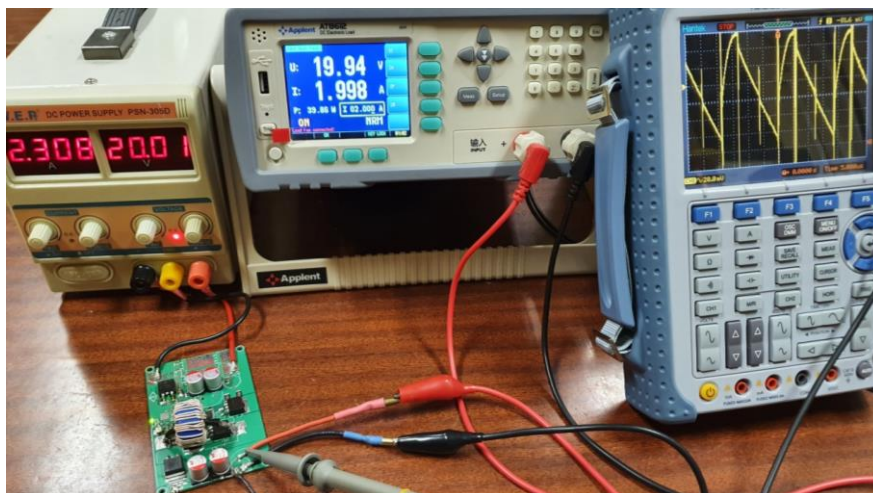
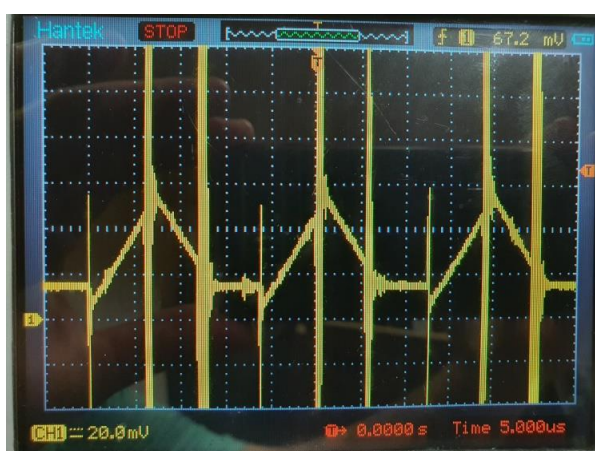


Рисунок 13: Испытания экспериментального образца в псевдо-РНТ.
На осциллографе – пульсации выходного напряжения.



а



б

Рисунок 14: а – напряжение на резистивном датчике тока экспериментального образца в псевдо-РНТ (сопротивление датчика 0.005 Ом), б – пульсации выходного напряжения экспериментального образца в псевдо-РНТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. В работе предложен новый силовой контур повышающе-понижающего ККМ с простой одноконтурной системой управления и свойством самокоррекции коэффициента мощности в режиме прерывистого тока дросселя. Данное решение позволяет сократить количество силовых диодов по сравнению с традиционным преобразователем на основе диодного моста и последовательно-параллельного DC-DC регулятора.

2. В работе предложены различные способы формирования входного тока ККМ в псевдо-РНТ. Применение предложенного в работе алгоритма управления повышающе-понижающим ККМ позволяет исключить перемножитель и реализовать СУ на основе микросхем низкой степени интеграции – операционных усилителей и компараторов, что является актуальным для военной и космической техники.

3. Показано, что применение псевдонепрерывного режима работы дросселя повышающе-понижающего ККМ позволяет уменьшить индуктивность дросселя ККМ по сравнению с РНТ в 5-6 раз и уменьшить пиковое значение тока дросселя на 20-40% по сравнению с РПТ.

4. Синтезирована непрерывная модель повышающе-понижающего ККМ для псевдо-РНТ, которая является обобщением известных моделей для РНТ и РПТ. Предложенная обобщенная непрерывная модель повышающе-понижающего преобразователя позволяет построить частотные характеристики преобразователя как объекта управления для различных режимов тока индуктивного накопителя.

5. Разработанные автором подходы к проектированию повышающе-понижающих ККМ с различными СУ позволяют уменьшить трудоемкость разработки ККМ. В работе показано влияние широкого диапазона входного напряжения и выходной мощности ККМ на запасы устойчивости, выработаны рекомендации по оптимальной настройке звеньев коррекции.

Это позволяет считать, что поставленная в работе цель разработки, совершенствования и исследования усредненных на периоде коммутации моделей силового контура и алгоритмов управления ККМ, позволяющих уменьшить трудоемкость проектирования, достигнута.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Дроздецкий С.В., Кругликов И.А., Ширяев А.О., Якименко И.В.** Использование интервала хранения для улучшения динамических свойств импульсного преобразователя // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20, №8. С. 35-39.

2. **Дроздецкий С.В., Кругликов И.А., Ширяев А.О., Якименко И.В.** Безмостовой корректор коэффициента мощности для автономных энергосистем // Практическая силовая электроника. 2017. №2. С. 32-37.

3. **Дроздецкий С.В.** Синтез системы управления безмостовым корректором коэффициента мощности в режиме прерывистого тока // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 66-72. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-66-72.

4. **Амелин С.А., Амелина М.А., Дроздецкий С.В., Якименко И.В.** Синтез цифрового контура управления по току повышающе-понижающего корректора коэффициента мощности в среде MATLAB/Simulink // Практическая силовая электроника. 2019. №1. С. 9-14.

5. **Амелин С.А., Амелина М.А., Дроздецкий С.В.** Обобщенная непрерывная модель безмостового корректора коэффициента мощности // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 91-100. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-91-100.

6. **Дроздецкий С.В., Кругликов И.А., Ширяев А.О., Якименко И.В.** Однофазный безмостовой корректор коэффициента мощности. Патент RU 2541910 С1. МПК G05F 1/70, заявка 2013159128/08, заявл. 30.12.2013, опубл. 20.02.2015 Бюл. № 5.

7. **Дроздецкий С.В., Кругликов И.А., Ширяев А.О., Якименко И.В.** Способ управления ключевыми преобразователями постоянного

напряжения в постоянное. Патент RU 2565577 C2. МПК H02M 3/135, заявка 2013159130/07, заявл. 30.12.2013, опубл. 20.10.2015 Бюл. № 29.

8. Дроздецкий С.В., Кругликов И.А., Ширяев А.О., Якименко И.В. Корректор коэффициента мощности с псевдонепрерывным током индуктивного накопителя. Патент RU 2720711 C1. МПК G05F 1/70, заявка 2019126770, заявл. 26.08.2019, опубл. 12.05.2020 Бюл. № 14.

9. Дроздецкий, С. В. Метод улучшения динамических свойств импульсных источников питания / С. В. Дроздецкий, И. А. Кругликов, А. О. Ширяев // Информационные технологии, энергетика и экономика : микроэлектроника и оптотехника, инновационные технологии и оборудование в промышленности, управление инновациями : сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск, 14–15 апреля 2016 года. – Смоленск: Универсум, 2016. – С. 70-73.

10. Сравнительная характеристика безмостового корректора коэффициента мощности и его аналогов / О. Д. Бабенко, М. А. Старовойтов, Н. А. Умпинович, С. В. Дроздецкий // Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика : Сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3-х томах, Смоленск, 22–23 июня 2017 года. – Смоленск: ООО "Принт-Экспресс", 2017. – С. 120-123.

11. Дроздецкий, С. В. Особенности работы повышающе-понижающего корректора коэффициента мощности в режиме непрерывного и прерывистого токов дросселя / С. В. Дроздецкий, В. И. Антоненков, Д. А. Гаврилов // Энергетика, информатика, инновации - 2018 : Сборник трудов VIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Смоленск, 18–19 октября 2018 года. – Смоленск: Универсум, 2018. – С. 94-99.

12. Дроздецкий, С. В. Использование однотактного обратного преобразователя в качестве источника питания для светодиодного светильника / С. В. Дроздецкий, В. С. Александров // Энергетика, информатика, инновации - 2019 : Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Смоленск, 17–18 октября 2019 года. – Смоленск: Универсум, 2019. – С. 408-411.

13. Полищук, Н. А. Построение непрерывной модели обратного преобразователя / Н. А. Полищук, А. Д. Юрченков, С. В. Дроздецкий // Энергетика, информатика, инновации - 2020 : Сборник трудов X Национальной научно-технической конференции с международным участием. В 3 т., Смоленск, 03–04 декабря 2020 года. – Смоленск: Универсум, 2020. – С. 180-183.

14. Непрерывные модели импульсных источников вторичного электропитания / С. А. Амелин, М. А. Амелина, С. В. Дроздецкий, И. В. Якименко // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 4. – С. 100-106. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_4_100.