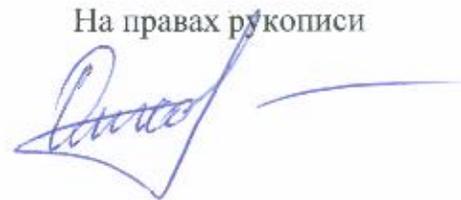


На правах рукописи



Олисовец Артём Юрьевич

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО
НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСТОЯННОЕ С ПОВЫШЕННЫМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ
ИСТОЧНИКОВ СВЕТА**

Специальность 05.09.12– Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

ТОМСК – 2019

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

Научный руководитель — доктор технических наук
Василий Иванович Туев.

Официальные оппоненты: Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, директор института силовой электроники ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск).

Оскирко Владимир Олегович, кандидат технических наук, научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения РАН (г. Томск)

Ведущая организация — ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «12» декабря 2019 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 при ТУСУР по адресу: г. Томск, пр-т Ленина 40, ТУСУР, ауд. 201.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.268.03.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/p7jqo3ck>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Костюченко Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Технический прогресс и стремительное увеличение количества потребителей энергии из питающей электрической сети приводят к необходимости уменьшения их взаимного влияния и улучшения их качественных показателей.

Одним из важных показателей качества потребителей электрической энергии является коэффициент мощности, минимальное допустимое значение которого нормируется Международной электротехнической комиссией (МЭК), Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, а также национальными требованиями для отдельных групп потребителей с последовательным добавлением в нормирование потребителей все меньшей мощности.

Ограничения по минимальному значению коэффициента мощности распространяются и на светодиодные источники света, включая лампы на светоизлучающих диодах в типоразмере ламп накаливания.

Полупроводниковые светоизлучающие диоды питаются постоянным током, поэтому в состав светодиодных источников света включают преобразователи переменного напряжения в постоянный или пульсирующий ток, параметры которых и определяют качество светодиодных источников света как потребителей электрической энергии и, в том числе, значение коэффициента мощности.

В этой связи разработка научно-технических основ проектирования и разработка новых технических решений полупроводниковых преобразователей переменного напряжения в постоянное с повышенными значениями коэффициента мощности является актуальной.

Степень разработанности темы

Повышению качества потребителей электрической энергии посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей, среди которых следует отметить работы Е.Е. Чаплыгина, А.А. Малаханова, Г.А. Белова, Г.Я. Михальченко, В.П. Климова, Б. Синга и др.

Увеличение значения коэффициента мощности достигается использованием активных и пассивных корректоров коэффициента мощности (ККМ).

Активные ККМ достаточно хорошо изучены, для их реализации разработана специальная компонентная база. Вместе с тем, разработка преобразователей переменного напряжения в постоянное с использованием активных ККМ приводит к увеличению массогабаритных показателей преобразователя, что не всегда возможно при конструировании светодиодных

ламп общего назначения мощностью до 15 Вт с использованием цоколей E27 и E14.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование и разработка полупроводниковых преобразователей переменного напряжения в постоянное с повышенным коэффициентом мощности для светодиодных источников света.

Достижение цели определяется решением следующих задач:

1. Разработка математической модели преобразователей переменного напряжения в постоянное для светодиодных источников света.

2. Разработка новых схемотехнических решений преобразователей напряжения с увеличенным значением коэффициента мощности.

3. Разработка нового способа управления единичными светоизлучающими диодами в светодиодном источнике света для увеличения значения коэффициента мощности.

Научная новизна работы определяется развитием метода анализа и моделирования схем и устройств силовой электроники, и созданием на этой основе новых устройств преобразования переменного напряжения в постоянное с улучшенными эксплуатационными характеристиками и, в том числе, с большими значениями коэффициента мощности.

Научной новизной, в частности, обладают следующие основные результаты работы.

1. Математическая модель полупроводникового преобразователя переменного напряжения в постоянное, позволяющая определять мгновенные значения напряжения на элементах схемы и протекающих через них токов и рассчитывать значение коэффициента мощности.

2. Зависимость значения коэффициента мощности пассивного ККМ от напряжения открывания динистора, позволяющая конструировать электрические преобразователи напряжения для светодиодных ламп различных мощностей.

3. Новый способ регулирования тока в светодиодных источниках света на единичных светоизлучающих диодах, позволяющий увеличить значение коэффициента мощности устройства.

Практическая значимость работы заключается в разработке, создании и внедрении преобразователей переменного напряжения в постоянное с увеличенными значениями коэффициента мощности для светодиодных источников света.

Создана новая методика определения напряжения открывания динистора, определяющего значение коэффициента мощности преобразователей переменного напряжения в постоянное для светодиодных ламп мощностью от двух ватт и выше.

Разработаны новые устройства преобразователей напряжения, защищенные патентами на изобретения и полезные модели:

1. Корректор коэффициента мощности.

2. Схема подключения светодиодного светового прибора в сеть переменного тока (два варианта).

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении работ по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» в рамках двух проектов:

1. «Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57714X0061;

2. «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

Результаты диссертационной работы так же используются в учебном процессе в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники при курсовом проектировании по дисциплине «Управление в светотехнических системах» для выполнения вычислительных экспериментов магистрантами направления подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах», магистерская программа «Управление в светотехнических системах».

Методы исследований

В работе использованы методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, численного моделирования, экспериментальных исследований.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Моделирование процессов, протекающих в преобразователе переменного напряжения в постоянное повторяющимися группами временных интервалов с привязкой границ интервалов к мгновенным значениям выходного напряжения позволяет определять форму тока, потребляемого от источника переменного напряжения, и рассчитывать значение коэффициента мощности.

2. Введение динистора (неуправляемого тиристора) в схему преобразователя переменного напряжения в постоянное позволяет увеличить коэффициент мощности устройства. Установлена определенная возрастающая зависимость значения коэффициента мощности в диапазоне от 0,7 до 0,75 от напряжения открывания динистора в диапазоне значений от 23,5 до 65 В.

3. Новый способ регулирования тока в светодиодных источниках света, заключающийся в синхронной с частотой питающей сети коммутацией единичных светоизлучающих диодов в группы из последовательно-параллельных цепей с количеством единичных светодиодов в последовательных цепях, пропорциональным мгновенному значению напряжения питающей сети, позволяет увеличить значение коэффициента мощности устройства до 0,99.

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим количеством экспериментальных данных, которые были получены в процессе выполнения работ с применением аттестованных методик, апробированных методов компьютерного моделирования и поверенных средств измерения.

Апробация работы

Основные разделы и результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: Международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2019, 2018, 2017), Международной научной - практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2018, 2017), Международной научной студенческой конференции «МНСК» (Новосибирск, 2015), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП)» (Новосибирск, 2016), на всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Санкт - Петербург, 2015).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 16 работ, из которых четыре статьи опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, одна – в сборнике, индексируемом в базе цитирования Scopus, три – патенты на изобретения и полезные модели, восемь – статьи в сборниках трудов научно-технических и практических конференций.

Личный вклад автора состоит в проведении моделирования и экспериментов, их анализе и формулировании выводов. Результаты, полученные автором, были достигнуты им лично или совместно при его участии.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 95 наименований, а также 3 приложений. Общий объем составляет 115 страниц, содержит 1 таблицу и 64 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы исследования, степень разработанности темы, цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробации результатов, публикации, личный вклад автора, структура и объем диссертационной работы.

В первой главе представлена актуальность исследования, представлены наиболее популярные на сегодняшний день светодиодные лампы в типоразмере ламп накаливания, предназначенные для применения в электрической сети переменного напряжения 220-230 В промышленной частоты.

Конструктивное исполнение светодиодных ламп типоразмера ламп накаливания можно разделить на две категории: филаментные светодиодные лампы (рисунок 1, а) и светодиодные лампы с расположением светодиодов на печатной плате (рисунок 1, б).

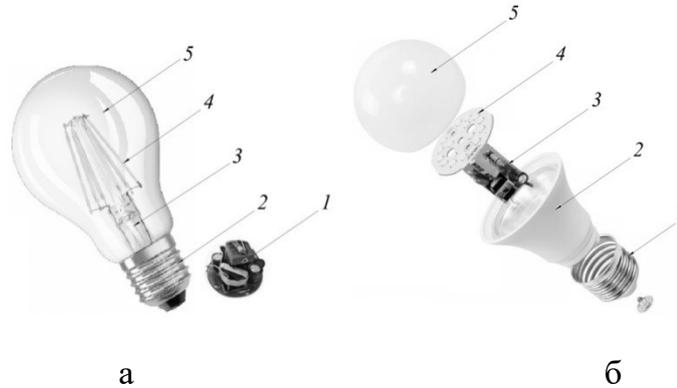


Рисунок 1 – Типовые конструкции светодиодных ламп типоразмера ламп накаливания

На рисунке 1а обозначено: 1-полупроводниковый понижающий преобразователь, расположенный в цоколе; 2-цоколь; 3-стеклянный держатель; 4-филамент; 5-колба, наполненная инертным газом.

На рисунке 1б обозначено: 1-цоколь; 2-теплорассеивающий корпус; 3-понижающий преобразователь; 4-печатная плата со светодиодами; 5-светорассеивающая линза.

Как видно, в обеих конструкциях (рисунок 1) светодиодных ламп типоразмера ламп накаливания помимо светодиодного светоизлучающего модуля предусматривается устройство преобразования переменного напряжения электрической сети в постоянное.

При проектировании светодиодной лампы необходимо проведение анализа и моделирование разрабатываемого устройства для подтверждения соответствия требованиям нормативных документов.

Полупроводниковый преобразователь переменного напряжения в постоянное включает диодный двухполупериодный (мостовой) выпрямитель и, таким образом, относится к классу нелинейных устройств, для моделирования и анализа которых необходимо использование методов анализа нелинейных электрических цепей.

Для решения задач диссертационного исследования наиболее подходящим является аналитический метод расчета при использовании характеристик нелинейных элементов для мгновенных значений при их кусочно-линейной аппроксимации, так как известен закон изменения во время физической величины, определяющей работу всего нелинейного устройства – переменного напряжения электрической сети промышленной частоты. В процессе анализа период переменного напряжения электрической сети представляется совокупностью последовательных интервалов времени, внутри которых цепь предполагается линейной и может анализироваться методами анализа линейных

электрических цепей. Границы временных интервалов соответствуют точкам сопряжения кусочно-линейной аппроксимации. При этом при анализе электрической цепи на границах временных интервалов необходимо учитывать переходные процессы, возникающие в электрической цепи.

Для рассматриваемого класса устройств преобразования переменного напряжения в постоянное наиболее подходящим является метод кусочно-линейной аппроксимации. При расчете этим методом осуществляется замена характеристики нелинейного элемента отрезками прямых линий, что позволяет перейти от нелинейного дифференциального уравнения к нескольким линейным уравнениям, отличающимся друг от друга лишь значениями коэффициентов и использовать методы анализа переходных процессов в линейных электрических цепях.

Проведен обзор активных и пассивных корректоров коэффициента мощности, применяемых в электротехнике и светотехнике. Обнаружены тенденции в области развития существующих и разработки новых преобразователей с повышенным коэффициентом мощности для светодиодных ламп.

Известно, что активные ККМ можно подразделить на ККМ с коммутацией ключей на сетевой частоте и ККМ с коммутацией ключей на повышенной частоте. В настоящее время активные ККМ, работающие на повышенной частоте, обеспечивают наилучшие результаты по коэффициенту мощности и реализуют разные методы коррекции коэффициента мощности:

- 1) метод граничного управления;
- 2) метод разрывных токов;
- 3) метод управления по пиковому значению тока;
- 4) метод управления по среднему значению тока.

Активные ККМ работают на частотах, измеряемых десятками и сотнями килогерц, и создают электромагнитные помехи (ЭМП) в радиочастотном диапазоне. Для уменьшения помех и приведения их значения под требования нормативной документации на входе устройства предусматривается фильтр ЭМП. Его размеры и количество звеньев определяются мощностью подключенной нагрузки и частотой работы цепей преобразования.

В любом случае применение активных ККМ приводит к увеличению массогабаритных показателей, что далеко не всегда возможно реализовать при конструировании светодиодных ламп типоразмера ламп накаливания с цоколями E27 и E14.

По этим причинам активные ККМ в настоящей работе далее не рассматриваются и исследование направлено на изучение пассивных ККМ.

Рассмотрены следующие пассивные ККМ:

- 1) пассивный ККМ с входным дросселем;
- 2) пассивный ККМ с входным конденсатором;
- 3) пассивный ККМ с входным LC фильтром;

4) диодно-емкостный пассивный ККМ .

Установлено, что наиболее часто используемым пассивным ККМ при конструировании светодиодных ламп в настоящее время является схема пассивного ККМ Valley Filler, обеспечивающая наиболее высокий коэффициент мощности, однако его применение в светодиодных лампах ограничено пульсацией выходного напряжения.

Во второй главе представлена математическая модель для определения формы потребляемого тока и напряжения на нагрузке выпрямительных устройств с пассивными ККМ и расчета значения коэффициента мощности.

Математическая модель рассматриваемой цепи строится в следующей последовательности:

1. Процессы, протекающие в цепи в установившемся режиме, разделяются на повторяющиеся группы временных интервалов, границы которых определяются изменением состояния диодов (с открытого до закрытого и наоборот).

2. Для каждого из интервалов составляется эквивалентная схема замещения, описывающая работу всего устройства для конкретного интервала. На этом конкретном интервале данная схема замещения анализируется методами линейных электрических цепей: операторным методом и классическим методом анализа переходных процессов.

3. В итоге, определяются формы потребляемого тока и напряжения на нагрузке, позволяющие рассчитать численное значение коэффициента мощности, пульсаций выходного напряжения и др.

Математическая модель получена с учетом следующих упрощений, ограничений и допущений:

1) не учитываются процессы рассасывания объемного заряда неосновных носителей в области базы и разряда барьерной емкости выпрямительных диодов;

2) значения сопротивлений диодов при протекании прямого тока приняты неизменными;

3) контактная разность потенциалов диодов принята равной нулю.

Рассмотрим применение математической модели на примере преобразователя с диодно-емкостным ККМ.

Схема преобразователя с диодно-емкостным ККМ приведена на рисунке 2.

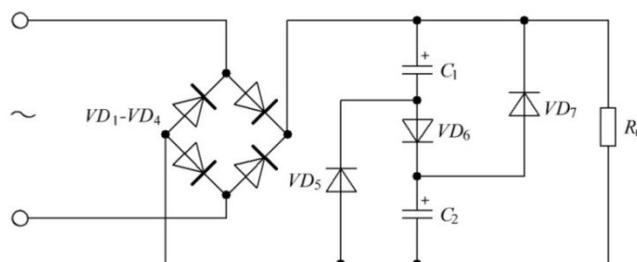


Рисунок 2 – Схема преобразователя с диодно-емкостным ККМ

Устройство содержит двухполупериодный выпрямитель на диодах VD_1 – VD_4 , два сглаживающих конденсатора C_1 и C_2 и диоды VD_5 – VD_7 . Диоды VD_1 – VD_7 приняты одинаковыми с внутренним сопротивлением r .

На диоды VD_1 – VD_4 подается переменное входное напряжение (1):

$$U_{\text{вх}}(t) = U_m \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение входного напряжения;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота питающей сети.

Для последующего расчета приняты амплитудное значение напряжения U_m , равное 311 В, значение частоты питающего напряжения $f = 50$ Гц. Значение сопротивления питающей сети принято равным нулю.

Процессы, протекающие в цепи (рисунок 4), можно разделить на повторяющиеся группы из четырех временных интервалов. Привязка границ интервалов к форме напряжения на нагрузке в установившемся режиме функционирования выпрямителя с ККМ иллюстрируется на рисунке 3: первый – от t_1 до t_2 , второй – от t_2 до t_3 и третий – от t_3 до t_4 , четвертый от t_4 до $t_1+T/2$.

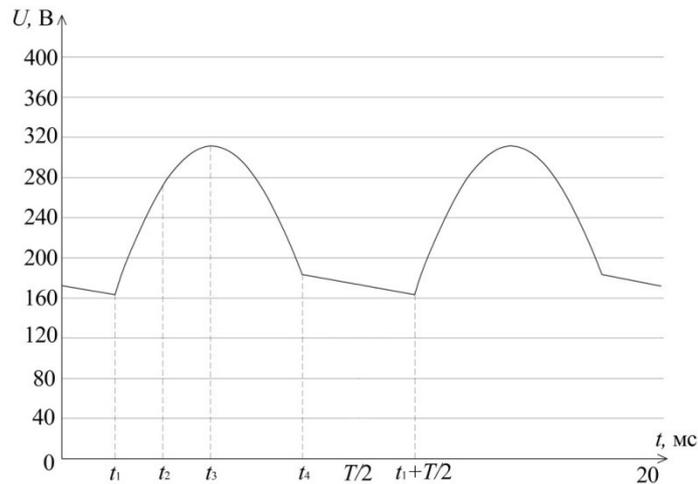


Рисунок 3 – Форма напряжения на нагрузке преобразователя с диодно-емкостным ККМ

На первом интервале от t_1 до t_2 (рисунок 3) диоды VD_5, VD_6 и VD_7 закрыты. Начинается первый интервал с момента превышения мгновенного значения модуля входного переменного напряжения остаточного потенциала на конденсаторах C_1 и C_2 , а заканчивается – моментом превышения мгновенного значения модуля входного напряжения суммы остаточных напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 . Эквивалентная схема цепи, поясняющая процессы в выпрямителе с пассивным ККМ для первого интервала, приведена на рисунке 4.

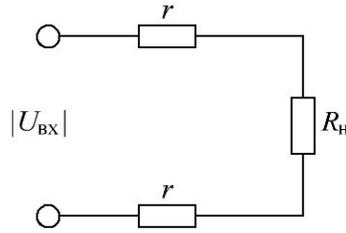


Рисунок 4 – Эквивалентная схема цепи для первого интервала от t_1 до t_2 преобразователя с диодно-емкостным ККМ

Ток, потребляемый от электрической сети на первом интервале $i_1(t)$, определяется током, протекающим через нагрузку $i_{н}(t)$. Конденсаторы C_1 и C_2 имеют остаточное напряжение, значения которых на первом интервале не изменяются.

Ток, протекающий через нагрузку, находится операторным методом анализа и рассчитывается по формулам:

$$i_{н}(t) = \frac{U_{m1}}{R_{н}} \cdot |\sin(\omega t)|, t = t_1, \dots, t_2, \quad (2)$$

$$U_{m1} = U_m K_1, \quad (3)$$

где K_1 – коэффициент передачи эквивалентной цепи :

$$K_1 = \frac{R_{н}}{R_{н} + 2r}. \quad (4)$$

На втором интервале от t_2 до t_3 диоды VD_5 и VD_7 закрыты, конденсаторы C_1 и C_2 включены последовательно через прямосмещенный диод VD_6 и заряжаются каждый до половины мгновенного значения входного напряжения. Момент времени t_2 находится графическим методом, а момент времени t_3 соответствует максимальному значению мгновенного напряжения на нагрузке. Эквивалентная схема цепи, поясняющая процессы в выпрямителе с пассивным ККМ для второго интервала приведена на рисунке 5. Эквивалентная емкость $C_{\text{посл}}$ последовательно включенных конденсаторов C_1 и C_2 определяется соотношением:

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (5)$$

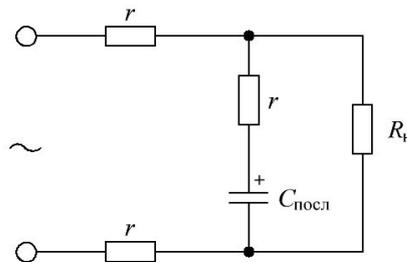


Рисунок 5 – Эквивалентная схема цепи для второго интервала от t_2 до t_3 преобразователя с диодно-емкостным ККМ

Одновременно протекают два процесса:

- 1) ток питающей сети протекает через нагрузку, при этом форма протекающего тока повторяет форму напряжения;
- 2) ток протекает через конденсатор $C_{\text{посл}}$, заряжая его.

Таким образом, модуль значения тока, потребляемого от электрической сети на втором интервале $|i_2(t)|$, равен сумме токов, протекающих через нагрузку i_H и эквивалентную емкость $C_{\text{посл}}$ последовательно включенных конденсаторов $i_{C_{\text{посл}}}$:

$$|i_2(t)| = i_H(t) + i_{C_{\text{посл}}}(t). \quad (6)$$

Мгновенное значение напряжения на нагрузке $U_H(t)$ определяется модулем мгновенного значения входного напряжения:

$$U_H(t) = U_{m2} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad t = t_2, \dots, t_3. \quad (7)$$

Численные значения амплитуды U_{m2} , фазы φ_1 и тока, протекающего через нагрузку, находятся операторным методом анализа и рассчитываются по формулам:

$$i_H(t) = \frac{U_{m2}}{R_H} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad t = t_2, \dots, t_3, \quad (8)$$

$$U_{m2} = U_m |W_2(p)|, \quad (9)$$

$$\varphi_1 = \text{Arg}(W_2(p)), \quad (10)$$

$$W_2(p) = \frac{Y}{Y+2r}, \quad (11)$$

$$Y = \frac{R_H \cdot Z}{R_H + Z}, \quad (12)$$

$$Z = r + \frac{1}{p \cdot C_{\text{посл}}}. \quad (13)$$

В момент времени, непосредственно предшествующий t_2 конденсаторы C_1 и C_2 имеют остаточный заряд, поэтому изменение напряжения на них на втором интервале определяется классическим методом анализа переходных процессов в виде суммы установившейся $U_{C_{\text{посл}Y}}$ и свободной $U_{C_{\text{посл}CB}}$ составляющих:

$$U_{C_{\text{посл}}}(t) = U_{C_{\text{посл}Y}}(t) + U_{C_{\text{посл}CB}}(t). \quad (14)$$

Установившееся напряжение на конденсаторе равно:

$$U_{C_{\text{посл}Y}}(t) = U_{m2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \left| \sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}) \right|, \quad (15)$$

где $\varphi_2 = -\text{arctg}(\omega \tau_1)$ – угол сдвига фаз между установившимся током в цепи и приложенным синусоидальным напряжением;

$\tau_1 = r C_{\text{посл}}$ – постоянная времени.

Свободная составляющая напряжения на конденсаторе определяется по формуле:

$$U_{C_{\text{посл}CB}}(t) = A_1 e^{-t/\tau_2}, \quad (16)$$

где A_1 – постоянная интегрирования;

$\tau_2 = C_{\text{посл}} \cdot \left(r + \frac{2r \cdot R_H}{2r + R_H} \right)$. – постоянная времени.

Подставляя (14) и (15) в (16) получим формулу для расчета переходного напряжения на конденсаторе:

$$U_{C_{\text{посл}}}(t) = \frac{U_{m2}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \sin\left(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) + A_1 e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (17)$$

Полагая, что значение напряжения на конденсаторе перед началом переходного процесса равно напряжению в начале переходного процесса $U_{C_{\text{посл}}}(-t_2) = U_{C_{\text{посл}}}(t_2)$, значение постоянной интегрирования определим по формуле:

$$A_1 = U_{C_{\text{посл}}}(t_2) - \frac{U_{m2}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \sin\left(\omega t_2 + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right). \quad (18)$$

Временную зависимость напряжения на конденсаторе $C_{\text{посл}}$ на втором интервале можно записать в виде:

$$U_{C_{\text{посл}}}(t) = \frac{U_{m2}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) + \left(U_{C_{\text{посл}}}(t_2) - \frac{U_{m2}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \sin\left(\omega t_2 + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, t = t_2, \dots, t_3. \quad (19)$$

Временная зависимость тока через последовательно включенные конденсаторы C_1 и C_2 определяется выражением:

$$i_{C_{\text{посл}}}(t) = C_{\text{посл}} \frac{dU_{C_{\text{посл}}}(t)}{dt}, \quad t = t_2, \dots, t_3. \quad (20)$$

После выполнения вычислений по формулам (8)-(20) и подстановки $i_{C_{\text{посл}}}$ в (7) определяется значение потребляемого тока на втором интервале.

На третьем интервале от t_3 до t_4 (рисунок 3) диоды VD_5 , VD_6 и VD_7 закрыты. Момент времени t_4 определяется равенством мгновенного значения модуля входного напряжения и потенциалов конденсаторов C_1 и C_2 , накопленных к моменту времени t_3 . В этот промежуток времени нагрузка находится под действием входного напряжения. Процессы, протекающие в исследуемом устройстве аналогичны первому интервалу. Эквивалентная схема цепи, поясняющая процессы в выпрямителе с пассивным ККМ для третьего интервала, аналогична приведенной на рисунке 4, а потребляемое значение тока рассчитывается по формулам (2)-(4) для $t = t_3, \dots, t_4$.

На четвертом интервале от t_4 до $t_1 + T/2$ диод VD_6 закрыт. Конденсаторы C_1 и C_2 через прямосмещенные диоды VD_5 и VD_7 включены параллельно и разряжаются через нагрузку. Напряжение на нагрузке экспоненциально уменьшается относительно начального значения в момент времени t_4 :

$$U_H(t) = U_{C_{\text{пар}}}(t_4) e^{-t/\tau_3}, \quad t = t_4, \dots, t_1 + T/2, \quad (21)$$

$$\tau_3 = C_{\text{пар}} \left(\frac{r}{2} + R_H \right),$$

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2.$$

Потребляемый от сети ток на данном интервале времени отсутствует.

Для построения временной зависимости напряжений и токов на четвертом интервале, необходимо найти численное значение t_1 и t_4 .

Численное значение t_4 определяется равенством мгновенного напряжения $U_2(t)$ и $U_{m2}/2$.

Момент времени t_1 находится при решении трансцендентного уравнения:

$$\sin(\omega t_1) = \sin(\omega t_4) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}. \quad (22)$$

Зная численные значения моментов времени t_1 , t_2 , t_3 и t_4 можно построить форму напряжения на нагрузке (рисунок 3) и форму потребляемого тока (рисунок 6).

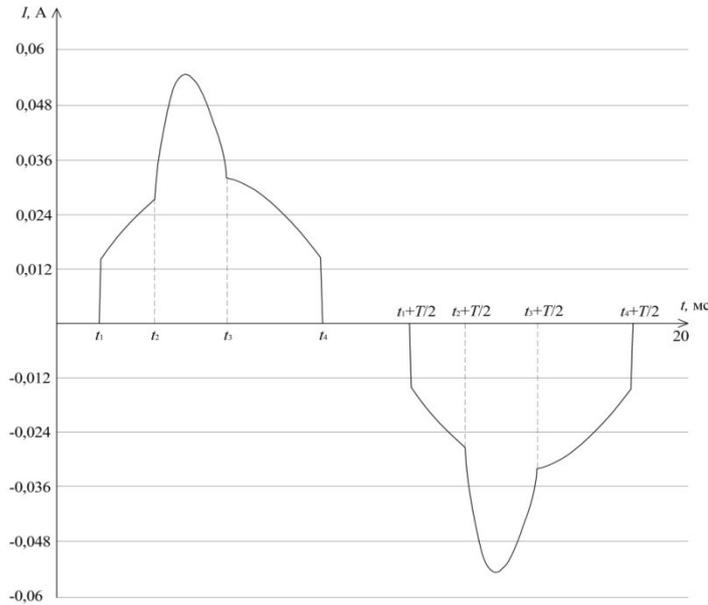


Рисунок 6 – Форма потребляемого тока преобразователя с диодно-емкостным ККМ

Для анализа гармонического состава тока необходимо функцию, описывающую форму потребляемого тока (рисунок 6) разложить в ряд Фурье, согласно формуле:

$$I(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot \sin(k\omega t), \quad (23)$$

где a_k , b_k – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

Коэффициент мощности K_p находится согласно формуле:

$$K_p = \frac{P}{S}, \quad (24)$$

где P – активная потребляемая мощность;

S – полная потребляемая мощность.

Значения активной и полной потребляемой мощности определяются соотношениями:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{вх}}(t) \cdot (a_1 \cdot \cos(\omega t) + b_1 \cdot \sin(\omega t)), \quad (25)$$

$$S = U_m \cdot \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t) \right]^2}. \quad (26)$$

Согласно вычислениям по формулам (1)-(26) для значений элементов схемы, приведенной на рисунке 2, $R_n = 13,5$ кОм, $C_1 = C_2 = 47$ мкФ, коэффициент мощности имеет значение равное 0,91.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет определить форму напряжения на нагрузке, осуществить спектральный анализ потребляемого тока выпрямительных устройств с пассивными ККМ и рассчитать значение коэффициента мощности.

В третьей главе представлены новые устройства преобразования переменного напряжения в постоянное. Показано применение разработанной в главе 2 математической модели для анализа ККМ с динистором, приведено описание устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой и устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой.

Устройство преобразователя с ККМ с динистором содержит ограничительный резистор R , двухполупериодный выпрямитель на диодах VD_1 - VD_4 , сглаживающий конденсатор C , диод VD_5 , неуправляемый тиристор (динистор) VD_6 и нагрузку R_n (рисунок 7).

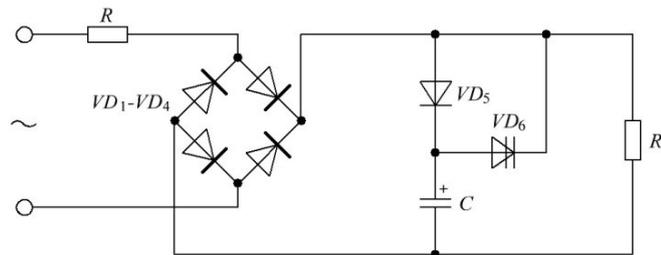


Рисунок 7 – Схема преобразователя с пассивным ККМ с динистором

Преобразователь с ККМ с динистором работает следующим образом.

На диоды VD_1 - VD_4 подается переменное входное напряжение (1).

На интервале времени от t_1 до t_2 (рисунок 8) конденсатор C через открытый диод VD_5 заряжается, напряжение на нем растет в соответствии с напряжением питающей сети.

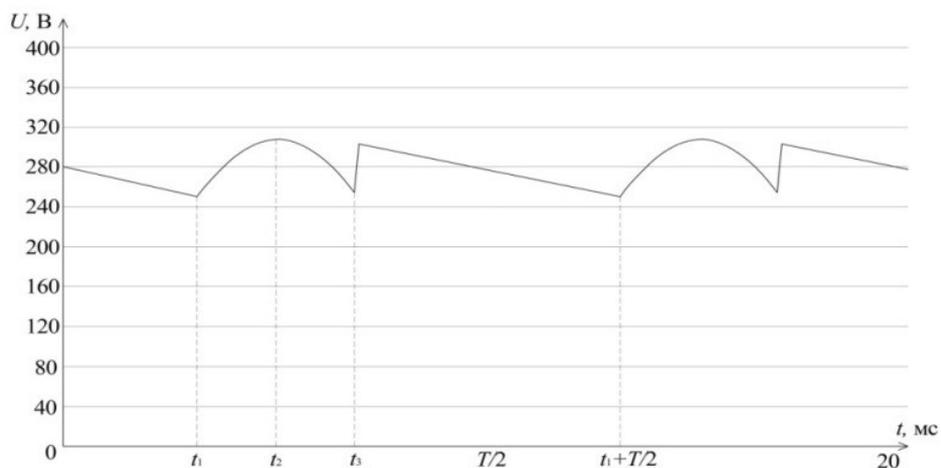


Рисунок 8 – Форма напряжения на нагрузке преобразователя с пассивным ККМ с динистором

При переходе мгновенного значения выпрямленного напряжения максимального значения (t_2 на рисунке 8) диод VD_5 запирается, на конденсаторе C сохраняется напряжение, равное максимальному значению выпрямленного напряжения в момент времени t_2 . Нагрузка R_H питается напряжением с выхода диодного выпрямителя.

Последующее уменьшение мгновенного напряжения на положительном выводе диодного выпрямителя приводит к увеличению разности потенциалов на выводах динистора VD_6 .

При достижении значения напряжения открывания динистора в момент времени t_3 динистор открывается и конденсатор C оказывается подключенным к нагрузке. Диодный выпрямитель закрывается и нагрузка R_H питается от конденсатора C , разряжая его. Напряжение на конденсаторе C уменьшается. Этот процесс продолжается до момента превышения мгновенного значения входного напряжения на положительном выводе диодного выпрямителя остаточной разности потенциалов конденсатора C (момент времени $t_1+T/2$ на рисунке 8). Затем описанный процесс периодически повторяется.

Форма потребляемого тока преобразователя с пассивным ККМ с динистором представлена на рисунке 9.

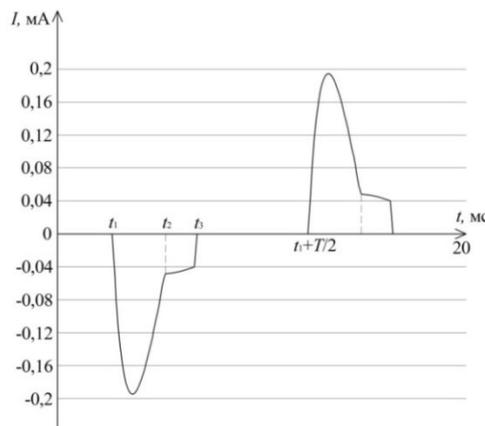


Рисунок 9 – Форма потребляемого тока преобразователя с пассивным ККМ с динистором

Предложенное техническое решение в соответствии с рисунком 7 характеризуется новизной, экспериментально подтвержденным более высоким значением коэффициентом мощности и защищено патентом на полезную модель №185192.

Известно, что мгновенное значение выпрямленного входного переменного напряжения изменяется по синусоиде в интервале от нуля до максимального положительного значения. Учитывая развитие микропроцессорной и быстродействующей коммутирующей техники, имеется возможность коммутировать светодиоды синхронно с мгновенным значением напряжения сети.

Предложенная идея коммутации светодиодов реализована в устройстве регулирования тока в светодиодных источниках света, которое содержит микроконтроллер 1 с двумя аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) 2 и 3, диодный выпрямитель 4, управляемые ключи 5.1, 5.2, 5.n-1 и 5.n, светоизлучающие диоды (СИД) 6.1, 6.2, 6.3, 6.n и резисторы 7, 8 и 9 (рисунок 10).

Для построения формы тока и расчета коэффициента мощности устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой была применена математическая модель, разработанная в главе 2.

Расчетное значение коэффициента мощности составило 0,94.

Предложенное техническое решение в соответствии с рисунком 10 характеризуется новизной, экспериментально подтвержденным более высоким значением коэффициента мощности и защищено патентом на изобретение №2602415.

В развитие идеи коммутации светодиодов синхронно с мгновенным значением напряжения сети предложено устройство регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой (рисунок 11).

В данном устройстве в каждый интервал времени между переключениями ключей за период переменного питающего напряжения светятся все n или почти все СИД, обеспечивая постоянство светового потока.

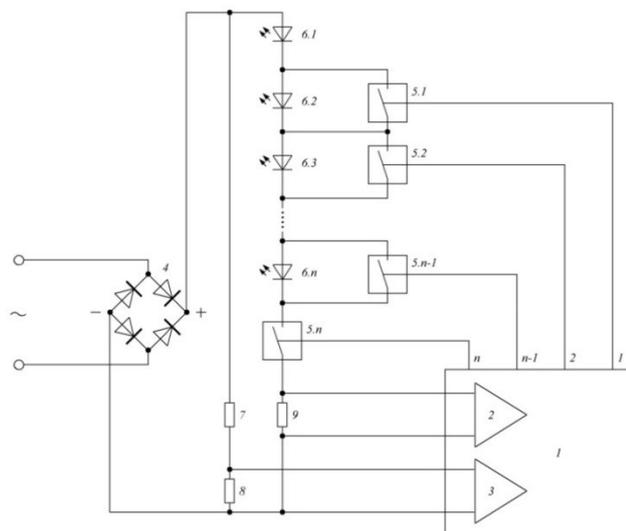


Рисунок 10 – Функциональная схема устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой

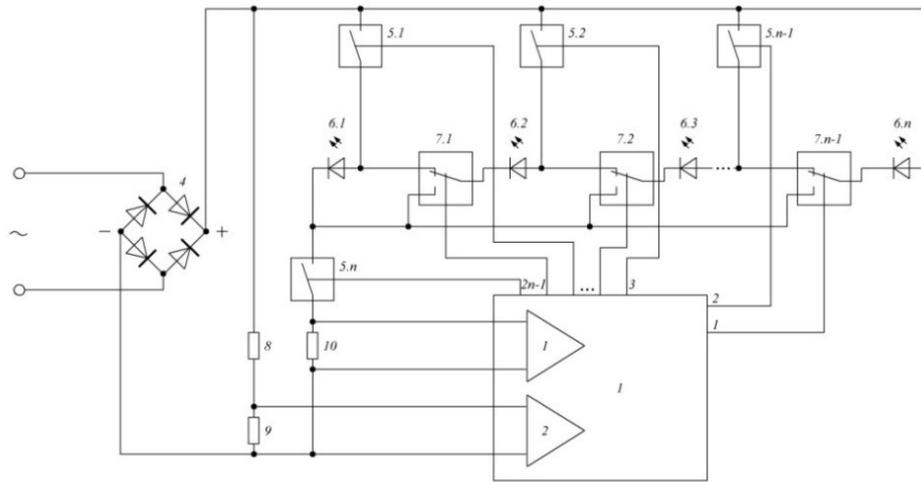


Рисунок 11 – Функциональная схема устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой

Расчетан коэффициент мощности согласно математической модели, представленной в главе 2. Расчетное значение коэффициента мощности составило 0,96.

Предложенное техническое решение в соответствии с рисунком 11 характеризуется новизной, экспериментально подтвержденным более высоким значением коэффициента мощности и защищено патентом на изобретение №2634493.

В четвертой главе представлены макеты новых устройств преобразования переменного напряжения в постоянное с повышенным коэффициентом мощности: корректор коэффициента мощности с динистором, устройство регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой и устройство регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой.

Для проведения экспериментальных исследований разработан и изготовлен макет преобразователя с ККМ с динистором по схеме, представленной на рисунке 7.

На рисунке 12 представлены расчетные формы потребляемого тока (а) и напряжения (б) на нагрузке преобразователя напряжения с ККМ с динистором, имеющего напряжение включения равное 23,5 В.

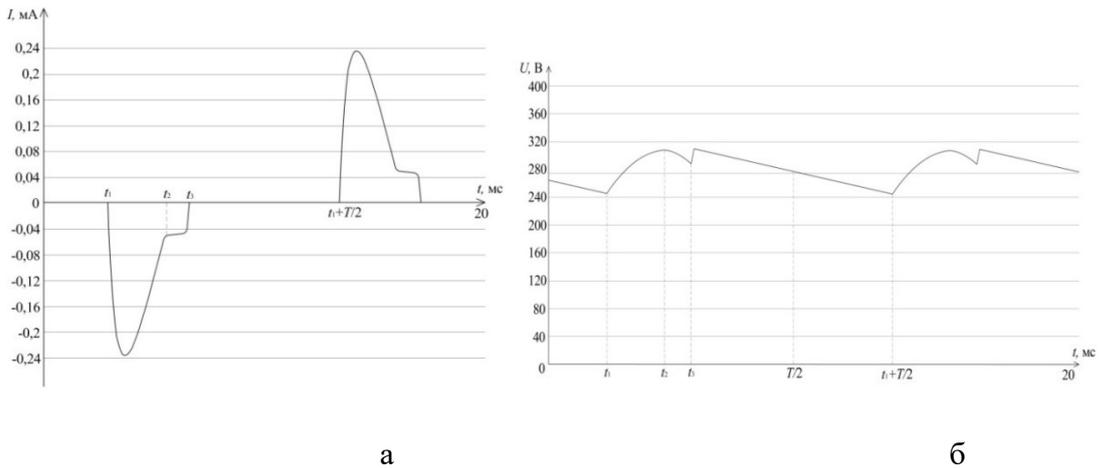


Рисунок 12 – Расчетная форма потребляемого тока (а) и напряжения (б) на нагрузке преобразователя напряжения с ККМ с динистором, имеющим напряжение включения 23,5 В

В результате математических расчетов значение коэффициента мощности составило 0,674.

Измерения формы потребляемого тока и входного напряжения макета преобразователя напряжения с ККМ с динистором, имеющего напряжение включения 23,5 В представлены на рисунке 13.

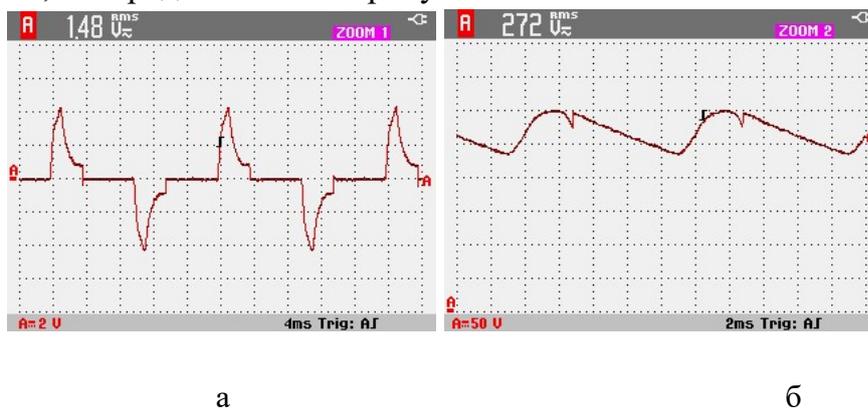


Рисунок 13 – Изображение экрана осциллографа с формой потребляемого тока (а) и формой напряжения на нагрузке (б) преобразователя напряжения с ККМ с динистором, имеющим напряжение включения 23,5 В

Также измерены значения коэффициента мощности макетов преобразователя напряжения с ККМ с динистором, имеющим напряжение включения 43, 50 и 65 В. Расчетные и экспериментально измеренные данные коэффициента мощности представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментально измеренные данные коэффициента мощности преобразователя напряжения с ККМ с динистором, имеющим напряжение включения 23,5, 43, 50 и 65 В

Напряжение открывания динистора, В	Коэффициент мощности, расчетное значение	Коэффициент мощности, измеренное значение	Расхождение, %
23,5	0,674	0,705	4,6
43	0,698	0,718	2,87
50	0,707	0,741	4,81
65	0,718	0,749	4,32

Установлена возрастающая зависимость значения коэффициента мощности в диапазоне от 0,7 до 0,75 от напряжения открывания динистора в диапазоне значений от 23,5 до 65 В.

Для проведения экспериментальных исследований согласно функциональной схеме (рисунок 10) разработан и изготовлен макет устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой.

На рисунке 14 представлена расчетная форма потребляемого тока устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой.

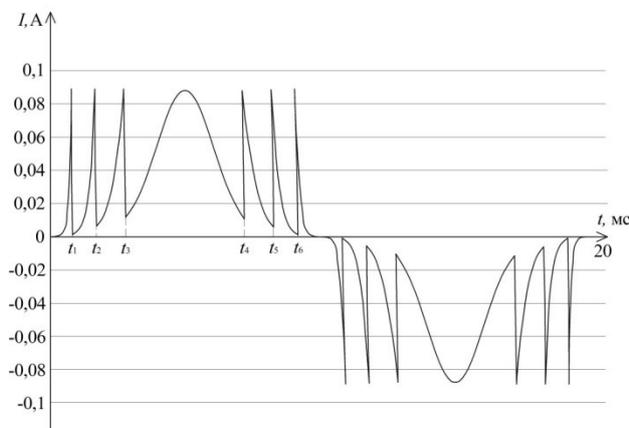


Рисунок 14 – Расчетная форма потребляемого тока устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой

На рисунке 15 представлена экспериментально измеренная форма потребляемого тока и входного напряжения.

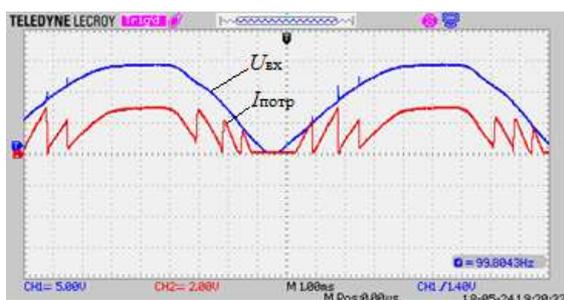


Рисунок 15 – Изображение экрана осциллографа с формой входного напряжения $U_{вх}$ и с формой потребляемого тока $I_{потр}$ устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой

Экспериментально измеренное значение коэффициента мощности макета равно 0,96.

Разница между экспериментальными и расчетными значениями составляет не более 2,5 %.

Для проведения экспериментальных исследований согласно функциональной схеме (рисунок 11) разработан и изготовлен макет устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой.

Расчетная форма потребляемого тока устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой представлена на рисунке 14.

На рисунке 16 представлена экспериментально измеренная форма потребляемого тока и входного напряжения.

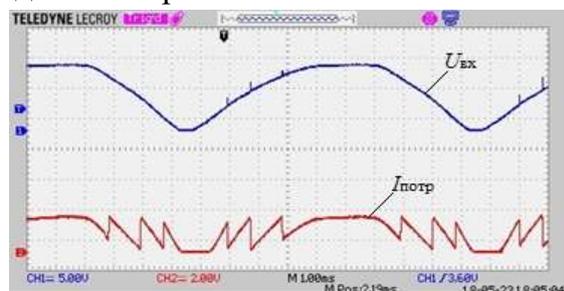


Рисунок 16 – Изображение экрана осциллографа с формой входного напряжения $U_{вх}$ и с формой потребляемого тока $I_{потр}$ устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой

Экспериментально измеренное значение коэффициента мощности макета равно 0,978.

Разница между экспериментальными и расчетными значениями составляет не более 2 %.

Таким образом, расхождение между расчетными и экспериментально измеренными значениями коэффициента мощности преобразователя напряжения с ККМ с динистором, устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой и

устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой составляет не более 5 %, что подтверждает точность и универсальность предложенной в главе 2 математической модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель полупроводникового преобразователя переменного напряжения в постоянное повторяющимися группами временных интервалов с привязкой границ интервалов к мгновенным значениями выходного напряжения, позволяющая определять мгновенные значения напряжения на элементах схемы и протекающих через них токов и рассчитывать значение коэффициента мощности. .

2. Предложен новый способ регулирования тока в светодиодных источниках света, заключающийся в синхронной с частотой питающей сети коммутацией единичных светоизлучающих диодов в группы из последовательно-параллельных цепей с количеством единичных светодиодов в последовательных цепях, пропорциональным мгновенному значению напряжения питающей сети, позволяющий увеличить значение коэффициента мощности устройства. Представленные устройства имеют повышенную надежность, поскольку в конструкции устройства отсутствуют сглаживающие электролитические конденсаторы, которые, как правило, определяют срок службы устройства. Дополнительный положительный эффект заключается в том, что представленное устройство имеет низкий коэффициент пульсаций и может функционировать при напряжении от 4 вольт при переменном и постоянном напряжении, что делает его универсальным в использовании.

3. Разработана новая методика определения напряжения открывания динистора, определяющего значение коэффициента мощности преобразователей переменного напряжения в постоянное для светодиодных ламп мощностью от 2 ватт и более. Введение динистора (неуправляемого тиристора) в схему преобразователя переменного напряжения в постоянное позволяет увеличить коэффициент мощности устройства. Установлена возрастающая зависимость значения коэффициента мощности в диапазоне от 0,5 до 0,78 от напряжения открывания динистора в диапазоне значений от 23,5 до 65 В.

4. Разработаны макеты преобразователя переменного напряжения с фильтрующим конденсатором, преобразователя с диодно-емкостным пассивным ККМ, преобразователя с пассивным ККМ с динистором, устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно соединенной нагрузкой и устройства регулирования тока в светодиодных источниках света с последовательно-параллельно соединенной нагрузкой. Проведено сравнение результатов расчетов по разработанной математической

модели с экспериментальными данными. Различие составляет не более 5%, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Таким образом, выполненная работа заключается в разработке научно-технических основ проектирования полупроводниковых преобразователей напряжения с повышенным коэффициентом мощности, в разработке новых технических решений корректора коэффициента мощности, устройства подключения светодиодного светового прибора в сеть переменного тока, совокупность которых позволила решить научно-техническую проблему, имеющую важное хозяйственное значение в развитии основ построения полупроводниковых преобразователей напряжения с повышенным коэффициентом мощности, что позволило существенно улучшить электромагнитную совместимость светодиодных источников света.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ и в журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science

1. Олисовец А.Ю., Туев В.И., Шкарупо С.П. Устройство питания светодиодной лампы с уменьшенным значением эмиссии помех // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск. – 2015. – №3. – С. 51-54 (ВАК).
2. Олисовец А.Ю., Туев В.И., Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н. Анализ срока службы светодиодных светоизлучающих элементов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №3(37). – С. 55-61(ВАК).
3. Олисовец А.Ю., Туев В.И., Шкарупо С.П. Нелинейные свойства полупроводниковых преобразователей напряжения для светодиодных источников света // Вестник Московского энергетического института. – Москва. – 2018. – №5. – С. 42-47 (ВАК).
4. Олисовец А.Ю., Туев В.И., Шкарупо С.П., Хабаров М.В., Иванов А.Н. Разработка математической модели преобразователя напряжения с корректором коэффициента мощности для светодиодных источников света // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск. – 2018. – №4-1. – Т. 21. – С. 119-124 (ВАК).
5. Oliyovets A.Y., Afonin K.N., Ryapolova Y.V., Soldatkin V.S., Starosek D.G., Tuev V.I., Hristyukov V.G. LED lamp design optimizing on minimum non-uniformity of light intensity distribution in space // 13th International scientific technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). – Novosibirsk. – V.1. – 2016. – pp. 153-155. (Scopus).
6. Олисовец А.Ю., Ряполова Ю.В., Иванов А.А., Старосек Д.Г. Разработка энергосберегающей светодиодной лампы на основе светодиодных линеек // Доклады 53-й Международной научной студенческой конференции «МНСК 2015». – Новосибирск. – 2015. – С. 21.

7. Олисовец А.Ю., Туев В.И., Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Иванов А.В., Алексеев А.П. Исследование макетных образцов светодиодных ламп общего назначения, изготовленных на основе светодиодных линеек // Материалы XX Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – Санкт-Петербург. – 2015. – С. 61.

8. Олисовец А.Ю., Шкарупо С.П., Туев В.И. Применение метода кусочно-линейной аппроксимации для анализа эмиссии гармоник устройства управления и питания светодиодных ламп с пассивным корректором коэффициента мощности // Материалы XXII Международной научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР 2017». – Томск. – 2017. – Т. 3. – С. 145-148.

9. Олисовец А.Ю., Шкарупо С.П., Туев В.И. Расчёт формы напряжения на нагрузке в устройстве питания с пассивным корректором коэффициента мощности // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления 2017». – Томск. – 2017. – Т.1. – С. 289-291.

10. Олисовец А.Ю., Афонин К.Н., Ряполова Ю.В., Солдаткин В.С. Испытание низковольтной светодиодной лампы на основе светодиодных излучающих элементов // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления 2017». – Томск. – 2017. – Т.1. – С. 273-276.

11. Олисовец А.Ю., Шкарупо С.П., Туев В.И., Решетов Д.А. Разработка линейного источника питания для маломощных светодиодных ламп // Материалы XXIII Международной научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР 2018». – Томск. – Т.2. – С. 302-305.

12. Олисовец А.Ю., Шкарупо С.П., Туев В.И., Решетов Д.А. Разработка устройства питания светодиодных источников света с повышенным коэффициентом мощности // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления 2018». – Томск. – Ч.1. – С. 258-260.

13. Олисовец А.Ю., Шкарупо С.П., Туев В.И., Решетов Д.А. Разработка линейного источника питания для маломощных светодиодных ламп // Материалы XXIV Международной научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР 2019». – Томск. – Ч.2. – С.39- 42.

14. Патент № 185192 U1 РФ, МПК H02M 7/06. Заявка № 2018124878 от 06.07.2018. Корректор коэффициента мощности / Солдаткин В.С., Иванов А.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И., Хабаров М.В. // Бюл. №33 от 26.11.2018.

15. Патент № 2602415 C1 РФ, МПК H05B 37/02. Заявка №2015124588/28 от 23.06.2015. Схема подключения светодиодного светового прибора в сеть переменного тока / Туев В.И., Шкарупо С.П., Олисовец А.Ю., Хомяков А.Ю., Солдаткин В.С., Иванов А.В., Ряполова Ю.В., Вилисов А.А. // Бюл. №32 от 20.11.2016.

16. Патент № 2634493 C2 РФ, МПК H05B 37/02. Заявка № 2016109678 от 17.03.2016. Схема подключения светодиодного светового прибора в сеть переменного тока / Туев В.И., Шкарупо С.П., Олисовец А.Ю., Хомяков А.Ю., Солдаткин В.С., Иванов А.В., Ряполова Ю.В., Вилисов А.А. // Бюл. № 31 от 31.10.2017.