

## Оглавление

Введение.....	2
1. Теоретический раздел.....	4
1.1. Обоснование актуальности задачи и необходимости ее решения	4
1.2. Общие сведения о светодиодах .....	7
1.3 Особенности светодиодных ламп с излучателями ленточной структуры .....	13
1.4 Обзор схем источников питания для светодиодных устройств...	18
2. Разработка источника питания .....	25
2.1 Разработка элементов структурной схемы.....	25
2.2. Разработка принципиальной схемы драйвера .....	32
3. Экспериментальный раздел .....	36

## Введение

Проблема высокого энергопотребления становится все более актуальной. Только на освещение уходит порядка 30-35% всей вырабатываемой электроэнергии, а в масштабах крупных городов эта величина в полтора-два раза больше. [1]

Светодиодное освещение — одно из перспективных направлений технологий искусственного освещения, основанное на использовании светодиодов в качестве источника света.

В течение последних десятилетий технический прогресс в области разработки и изготовления светодиодов идет с большой скоростью. [2] Современные светодиоды отличаются миниатюрностью, прочностью, надёжностью, хорошими оптическими характеристиками и высоким квантовым выходом излучения. В отличие от многих других источников света светодиоды могут преобразовывать электрическую энергию в световую с коэффициентом полезного действия близким к единице.

Переход на более экономичные светодиодные светильники позволяет снизить энергопотребление в 10 раз по сравнению с лампами накаливания и в 2 раза по сравнению с люминесцентными лампами.

Прогресс в развитии светодиодов находится в самом расцвете. Непрерывное совершенствование технологии способствует этому. Поэтому ожидается, что роль светодиодов будет только возрастать и в будущем они станут основными источниками света.

Тем не менее, в настоящее время одним из наиболее распространенных источников света по-прежнему остается классическая лампа накаливания.

Объединить преимущества классических ламп накаливания и светодиодных излучателей позволяют источники света, выполненные по технологии Filament LED.

По внешнему виду и характеристикам излучения они настолько близки к классическим электролампам, что их с полным правом можно назвать светодиодными лампами накаливания. [3] Самое главное отличие осветительных устройств LED Filament от классических светодиодных ламп – это диаграмма светового потока, практически полностью аналогичная диаграмме лампы накаливания. То есть светодиодные излучатели светят практически равномерно во все стороны, так же как и обычные. При этом эффективность осветительных устройств LED Filament несколько выше, а коэффициент пульсаций составляет менее 0,5% – т.е. приблизительно равен нулю.

Для нормального функционирования такого источника света, его необходимо обеспечить стабилизатором тока, соответствующий необходимым параметрам и требованиям. Стабилизатор поддерживает значение заданного тока через светодиод независимо от величины входного напряжения и во многом определяет функциональные, светотехнические показатели и надежность осветительного устройства в целом.

Темой данного проекта является разработка источника питания для светодиодной лампы с излучателями ленточной структуры.

Для проектирования источника питания необходимо исследовать процессы в силовом преобразователе, а так же провести исследование и поиск по уже существующим источникам питания.

# 1. Теоретический раздел

## 1.1. Обоснование актуальности задачи и необходимости ее решения

Последние достижения в области светодиодной технологии сделали осветительные приборы на светодиодах жизнеспособным, привлекательным и предпочтительным решением для повседневного освещения в различных сферах деятельности человека. [4]

Энергоэффективность световых приборов с белыми светодиодами сравнима, а в некоторых случаях даже превосходит энергоэффективность компактных люминесцентных ламп (КЛЛ). По световому потоку и качеству света светодиоды также не уступают многим традиционным источникам света. Высокие показатели энергоэффективности, светового потока и качества света делают светодиодные осветительные приборы весьма привлекательными для пользователей.

Правильно сконструированные светодиодные устройства освещения обеспечивают превосходное смешение света, высокую однородность освещения, а также сохраняют высокий световой поток в течение не менее 50000 часов работы, что дает им серьезное преимущество в случаях, когда замена ламп или осветительной арматуры затруднена или невозможна.

Светодиодные системы освещения являются рентабельным решением, поскольку вложения окупаются. Изначально затраты на светодиодное освещение могут превышать расходы на традиционные системы, однако сокращение общего количества работ и затрат на обслуживание, электроэнергию и замену осветительных приборов снижает общую стоимость владения. Период окупаемости светодиодных систем освещения обычно не превышает трех лет, а в некоторых случаях может равняться одному году. С течением времени первоначальные и совокупные затраты на светодиодные системы будут только снижаться.

Увеличивающееся количество законов, инициатив и стандартов, направленных на повышение энергоэффективности и снижение вредного

воздействия систем освещения на окружающую среду, стимулируют использование светодиодов как при установке новых, так и при модернизации существующих систем освещения.

Использование светодиодов в качестве альтернативы традиционным источникам света обусловлено рядом преимуществ светодиодных систем:

- Светодиоды обладают большей энергоэффективностью, чем лампы накаливания и галогенные лампы, и сопоставимой с компактными люминесцентными лампами.

- Светодиодные источники света излучают направленный свет только в нужном направлении, что позволяет лучше управлять светом и применять более эффективную оптику.

- Качество света, полученного с помощью белых светодиодов сопоставимо с люминесцентными лампами. Светодиоды позволяют обеспечить постоянство цвета и цветовую температуру.

- Светодиоды отличаются значительно большим, по сравнению с другими источниками света, сроком службы, что позволяет уменьшить расходы на замену и обслуживание. Например, галогенные лампы подлежат замене до 20 раз чаще светодиодных.

- Возможность использования светодиодов после значительного уменьшения светового потока.

- С момента появления светодиодов ежегодно эффективность по параметрам светового потока увеличивается на 35%, а стоимость снижается в среднем на 20%. То есть, происходит удвоение общей эффективности светодиодов каждые 1,5...2 года.

- Светодиоды не испускают инфракрасного излучения, что позволяет размещать их в там, где требования безопасности не допускают установку иных систем освещения.

- Светодиоды, в отличие от люминесцентных ламп, не излучают ультрафиолетовых лучей, негативно влияющих на краски, что делает

возможным их установку в музеях, витринах магазинов, художественных галереях.

- Светодиоды выделяют тепло, но излучаемый свет является холодным, что при правильном теплоотводе позволяет защитить пользователей от лишнего теплового воздействия.

- Светодиодные устройства освещения работоспособны при низких температурах и воздействии вибраций. Это важно там, где нельзя использовать и проводить обслуживание ламп другого типа.

- LRGB-светильники и приборы с настраиваемым белым светом имеют различные цветовые температуры и воспроизводят огромное количество цветов без применения светофильтров.

- Достичь наибольшей эффективности и гибкости позволяет использование цифровых контроллеров, которые осуществляют управление светодиодными системами.

- Устройства освещения, выполненные на основе светодиодов, являются безынерционными, то есть они не требуют времени для прогрева и отключения, следовательно не оказывается вредное воздействие циклической подачи питания.

- Светодиоды, в отличие, например, от люминесцентных ламп, не содержат ртути и не требуют специальных условий утилизации, они экологически безопасны.

- Многие выпускаемые светодиодные осветительные приборы не только отвечают требованиям стандартов по энергоэффективности и экологичности, но и зачастую превосходят их. В настоящее время проходит разработка стандартов проведения испытаний и измерения параметров, которые обеспечат базу для сравнения характеристик разных светодиодных осветительных приборов как между собой, так и с традиционными источниками света.

Для того чтобы светодиодное освещение вошло в перечень традиционных источников света нужно решить ряд задач, таких как: выбор

светодиодов, выбор конструкции светильника, оптической системы, выбор или разработка источника питания (драйвера).

## **1.2. Общие сведения о светодиодах**

Светодиод (сокращенно СИД – светоизлучающий диод, в английском варианте LED – light emitting diodes) – твердотельный полупроводниковый прибор, являющийся источником света. Имеет электронно-дырочный p-n переход или контакт металл-полупроводник, который, при протекании через него электрического тока, генерирует оптическое (видимое, УФ, ИК) излучение.[5]

Светодиод представляет собой полупроводниковый p-n-переход (электронно-дырочный переход). В процессе легирования, материал n-типа обогащается отрицательными носителями заряда, а материал p-типа – положительными носителями заряда. Атомы в материале n-типа приобретают дополнительные электроны, а атомы в материале p-типа приобретают дырки – места на внешних электронных орбитах атомов, в которых отсутствуют электроны.[4]

При приложении к диоду электрического поля электроны и дырки в материалах p- и n-типа устремляются к p-n-переходу. Когда носители заряда подходят к p-n-переходу, электроны инжектируются в материал p-типа. При подаче отрицательного напряжения со стороны материала n-типа через диод протекает электрический ток в направлении от материала n-типа в материал p-типа. Это называется прямым смещением.

Когда избыточные электроны переходят из материала n-типа в материал p-типа и рекомбинируют с дырками, происходит выделение энергии в виде фотонов, элементарных частиц (квантов) электромагнитного излучения. Все диоды испускают фотоны, но не все диоды испускают видимый свет. Материал, из которого изготавливается светодиод, выбирается таким образом, чтобы длина волны испускаемых фотонов находилась в пределах видимой области спектра излучения. Разные материалы испускают

фотоны с разными длинами волн, что соответствует разным цветам испускаемого света.

Пучок видимого света, испускаемого светодиодом, является холодным, но так как в светодиодах имеются потери, то на p-n-переходе генерируется тепло, иногда достаточно большое, поэтому ограничение температуры p-n-перехода с помощью правильно сконструированного теплоотвода и других методов контроля температуры является очень важным для обеспечения нормальной работы светодиода, оптимизации его светового потока и повышения срока службы.

#### *Типы светодиодов.*

Светодиоды делятся на два: индикаторные и осветительные. Индикаторные светодиоды, как правило, недорогие источники света малой мощности, которые используются в качестве световых индикаторов в различных приборах, а также для подсветки дисплеев, приборных панелей. Осветительные светодиоды, в свою очередь, подразделяются на светодиоды поверхностного монтажа (SMD), высокой яркости (HV) и высокой мощности (HP) – это более мощные устройства, обеспечивающие необходимый уровень освещенности и обладающие световым потоком, сопоставимым или большим, чем, например, у компактных люминесцентных ламп.

На рисунке 1 представлены базовые конструктивные элементы осветительных светодиодов.

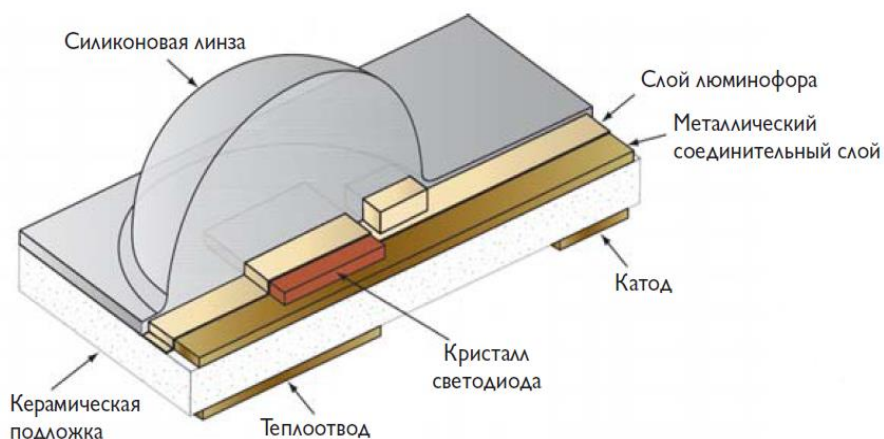


Рисунок 1 – Конструкция осветительного светодиода



Основными элементами являются полупроводниковый чип (или кристалл), подложка, на которую он устанавливается, контакты для электрического подключения, соединительные проводники для подсоединения контактов к кристаллу, теплоотвод, линза и корпус.

Для обеспечения отвода излишнего тепла, корпус осветительных светодиодов напрямую припаивается к поверхности. Хороший теплоотвод необходим для нормального температурного режима и работы светодиода.

#### *Получение белого света с помощью светодиодов.*

Существует два способа получения белого света с помощью светодиодов:

- Согласно цветовой модели RGB (Red, Green, Blue), белый цвет получается с помощью пропорционального смешивания красного, зеленого и синего цветов. При использовании метода RGB белый свет получается при объединении излучения красного, зеленого и синего светодиодов.

- Люминофорная технология получения белого света предполагает использование одного светодиода коротковолнового излучения, например, синего или ультрафиолетового, в комбинации с желтым люминофорным покрытием. Фотоны синего или ультрафиолетового излучения, генерируемые светодиодом, либо проходят через слой люминофора без изменения, либо преобразуются в нем в фотоны желтого света. Комбинация фотонов синего и желтого цвета создает белый свет.

Метод RGB дает возможность создавать белый свет точного оттенка, имеющий способность подчеркивать освещаемые цвета. Однако для создания белого цвета RGB требуется сравнительно сложное оборудование, так как в одном источнике необходимо использовать сразу три светодиода. При этом получаемый свет неестественно передает пастельные тона, что является основным следствием низкого индекса цветопередачи белого света, полученного с помощью рассматриваемого метода.

Белые люминофорные светодиоды обеспечивают лучшую цветопередачу, чем белые RGB-светодиоды, в большинстве случаев

сравнимую с люминесцентными источниками света. От белых RGB-источников света они также отличаются высокой энергоэффективностью. Именно высокая энергоэффективность и хорошая цветопередача делают люминофорные технологии предпочтительным способом получения белого света.

*Вольт - амперная характеристика светодиода.*

Работу светодиода наглядно описывает вольт – амперная характеристика (ВАХ), то есть зависимость проходящего через диод тока от приложенного к нему напряжения (рисунок 2). При приложении обратного (запирающего) напряжения любой диод ток не проводит. В отличие от выпрямительных диодов, светодиоды не допускают больших значений обратных напряжений.

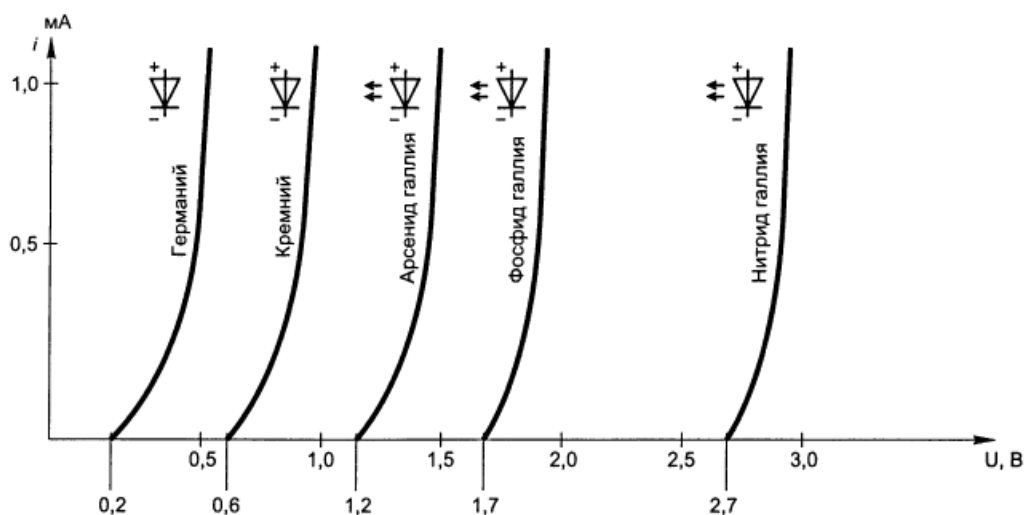


Рисунок 2 – ВАХ светодиода

Прямая ветвь ВАХ светодиодов отличается от ВАХ обычных диодов только значением напряжения открывания и падением напряжения в открытом состоянии. Если германиевые диоды открываются при напряжении от 0, до 0,2 В, кремниевые – от 0,6 до 0,7 В, то напряжение открывания светодиодов лежит в диапазоне от 1,2 до 2,9 В. После открывания напряжение на светодиодах немного растёт с увеличением тока, стабилизируясь на определённом уровне уже при токе порядка 1мА. Это означает, что светодиод в практических схемах может работать только как

токовый прибор. Из рисунка хорошо видно, что разница между напряжением зажигания светодиода и неконтролируемым увеличением тока через него составляет всего 0,3 В.

#### *Схемы включения светодиодов.*

Так как у светодиодов вольт – амперная характеристика является не линейной (рисунок 2) то, при достижении определенного значения напряжения, ток через светодиод резко возрастает, в связи с чем необходимо ограничить ток до определенного значения. Простым способом ограничить ток является балластный резистор.

Включение светодиодов в схеме бывает параллельным, последовательным и смешанным.[5]

При последовательном включении (рисунок 3), протекающий через светодиоды ток  $I$  будет равен:

$$I = \frac{U_{num} - (U_{VD1} + U_{VD2} + U_{VD3})}{R},$$

где  $U_{num}$  – напряжение питания, В;

$U_{VD1}, U_{VD2}, U_{VD3}$  – значение напряжения на светодиодах, В;

$R$  – балластный резистор, Ом.

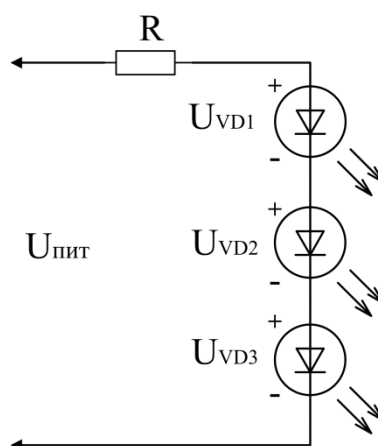


Рисунок 3 – Вариант с последовательным включением светодиодов

Последовательное включение светодиодов позволяет увеличить мощность излучения, а также излучаемую поверхность. К недостаткам относится увеличение напряжение питания с увеличением числа светодиодов, так как необходимо соблюдать условие:  $U_{num} > U_{VD1} + U_{VD2} + U_{VD3}$ .

Также недостатком является низкая надёжность системы, поскольку в случае, если один из светодиодов выходит из строя, перестают работать все остальные.

В схеме с параллельным включением светодиодов (рисунок 4) ток задается отдельным балластным резистором. Суммарный ток, потребляемый из источника питания равен:

$$I = \frac{U_{пит} - U_{VD1}}{R_1} + \frac{U_{пит} - U_{VD2}}{R_2} + \frac{U_{пит} - U_{VD3}}{R_3}$$

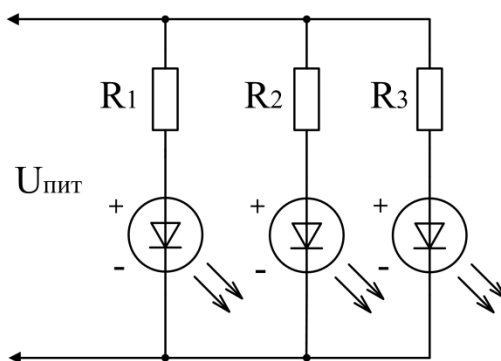


Рисунок 4 – Вариант с параллельным включением светодиодов

Преимуществом параллельного включения является высокая надёжность, то есть, поломка одного из излучателей не сказывается на работоспособности осветительного устройства в целом. Недостатками данной схемы включения являются повышенное энергопотребление и увеличение потерь на балластных резисторах.

Наиболее эффективное является смешанное последовательно – параллельное включение (рисунок 5). В этом случае число последовательных излучателей ограничено питающим напряжением, а количество параллельных соединений принимается исходя из заданной мощности.

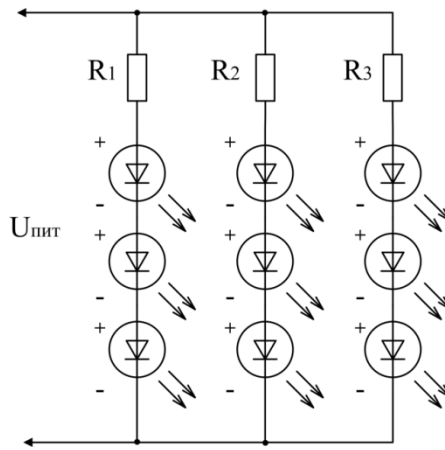


Рисунок 5 – Вариант со смешанным включением светодиодов

Ток, потребляемый из источника питания при смешенном соединении равен:

$$I = \frac{U_{пит} - n \cdot U_{VD}}{R},$$

где  $n$  – число последовательно включённых светодиодов в одной ветви.

Смешенное соединение включает в себя все положительные свойства вариантов последовательного и параллельного соединения, и поэтому будет выбрано в качестве предпочтительного.

### 1.3 Особенности светодиодных ламп с излучателями ленточной структуры

Во многих моделях светильников нить накала лампы является важным элементом дизайна. Поэтому заменить лампу накаливания в них до недавнего времени было нечем. Создать компактную люминесцентную лампу (КЛЛ), которая по форме светящегося тела точно соответствовала бы лампе накаливания, физически невозможно. Светодиоды являются миниатюрными источниками света, что открыло перспективы решения данной проблемы. Например, были созданы лампы, в которых светодиоды располагались на узкой линейке внутри колбы, линейка, в свою очередь, соединялась с теплоотводом вне колбы. Недостатками такой конструкции были ограничение по мощности (светодиодная лампа по световому потоку эквивалентна лампе накаливания мощностью не более 25 Вт), а также

высокая стоимость. К тому же полного соответствия дизайна лампе накаливания достичь так и не удалось. [6]

В 2008 г. японской компанией Ushio были созданы первые светодиодные лампы, внешне неотличимые от ламп накаливания. Новинка получила название Filament LED Bulb от английского слова Filament, в переводе означающее «нить накаливания». В русском языке сначала появился термин «светодиодные лампы накаливания», однако, он не прижился, так как объединял в себе противоречащие друг другу понятия. В настоящее время устоялся термин «филаментные светодиодные лампы» (ФСЛ).

В 2013 г. несколько китайских компаний одновременно представили мощные ФСЛ для общего освещения, эквивалентные по световому потоку лампам накаливания мощностью до 60 Вт.

Следует отметить, что, хотя создание ФСЛ и диктовалось в первую очередь эстетическими соображениями, разработка их конструкции не сводилась только к размещению светодиодов таким образом, чтобы они имитировали нить накаливания. Пришлось глубоко переосмыслить множество вопросов, связанных с конструкцией светодиодных источников света, в результате чего получилась принципиально новая разновидность ламп.

Модель филаментной лампы представлена на рисунке 6.

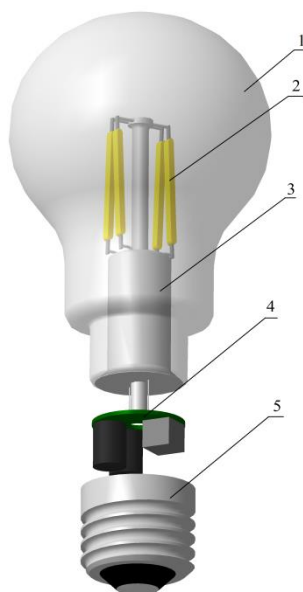


Рисунок 6 – Трехмерная модель источника света по технологии Filament LED

Основными компонентами этой лампы являются: 1 – колба; 2 – излучающий элемент; 3 – опорная конструкция; 4 – устройство питания (драйвер); 5 – цоколь.

По внешнему виду и характеристикам излучения они настолько близки к классическим электролампам, что их с полным правом можно назвать светодиодными лампами накаливания. [3] Самое главное отличие осветительных устройств LED Filament от классических светодиодных ламп – это диаграмма светового потока, практически полностью аналогичная диаграмме лампы накаливания. То есть светодиодные излучатели светят практически равномерно во все стороны, так же как и обычные. При этом эффективность осветительных устройств LED Filament несколько выше, а рабочая температура корпуса – примерно на 10 градусов ниже. Коэффициент пульсаций у большинства ламп этого типа составляет менее 0,5% – т.е. приблизительно равен нулю. Использование различных вариантов люминофоров в нитевидных светодиодных излучателях позволяет выпускать устройства освещения с различной цветовой температурой (отенок белого света по шкале "теплый-холодный") – от 2700 К (теплый, стандартная

лампочка накаливания) до 6500 К (холодный, дневной свет).

В основе ФСЛ лежит технология Chip-on-Glass (COG), ранее уже успешно опробованная при создании дисплеев для мобильных устройств. Она заключается в размещении сверхминиатюрных светодиодов на подложке из искусственного сапфира или, как более дешевый вариант, из специального сорта стекла. Прозрачность подложки позволяет создавать массивы светодиодов, которые светят во все стороны. [6]

На рисунке 7 представлена структура светодиодного излучателя.

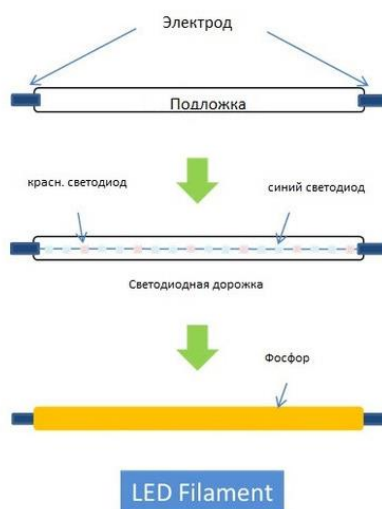


Рисунок 7 – Структура LED Filament

Типичный филамент — светодиодный аналог отрезка нити накаливания — представляет собой стержень из искусственного сапфира или стекла длиной диаметром 1,5 мм и длиной 30 мм. На нем при помощи технологии COG размещены 28 светодиодов синего свечения, которые соединены последовательно. В некоторых моделях филамент может содержать несколько светодиодов красного свечения для достижения более теплого оттенка свечения, при этом общее число светодиодов в филаменте также равно 28. Сверху это все покрыто слоем люминофора на силиконовой основе. Потребляемая мощность одного филамента лежит в пределах 0,8-1,3 Вт. Набирая нужное количество филаментов в колбе, можно получить светодиодную лампу требуемой мощности. Известны модели ФСЛ, содержащие до 16 филаментов.



Важным преимуществом филамента по сравнению с традиционными светодиодными матрицами является то, что для равномерного распределения света во все стороны не нужно использовать сложную оптическую систему, вносящую большие потери. Это обеспечивает высокий КПД лампы. Мощность, подводимая к филаменту, в 1,5 раза выше, чем к традиционной светодиодной матрице, при равном значении светового потока.

Филаменты герметично запаяны в стеклянную колбу. Эта колба наполнена специальным газом, обладающим высокой теплопроводностью. Именно через газ и осуществляется отвод тепла от светодиодов. Стеклянная колба с тонкими стенками хорошо проводит тепло, поэтому она и используется в качестве теплоотвода. По утверждению производителей ФСЛ, такая система теплоотвода в ряде случаев оказывается даже более эффективной, чем у светодиодных ламп традиционной конструкции, температура р-п перехода не превышает 60°C. При изготовлении колб и наполнении их газом используются уже хорошо отработанные для ламп накаливания процедуры.

Большой интерес к ФСЛ со стороны как специалистов, так и обычных потребителей связан с тем, что эти лампы имеют целый ряд неоспоримых преимуществ:

- полная совместимость по кривой силы света со светильниками, изначально проектировавшимися под лампы накаливания;
- высокая светоотдача, обусловленная отсутствием оптической системы для равномерного распределения света в разные стороны;
- возможность снижения себестоимости производства за счет использования уже имеющихся мощностей по производству ламп накаливания;
- преодоление психологического барьера при использовании светодиодного освещения в быту.

В то же время, ФСЛ свойственны и некоторые недостатки:

- малое место под драйвер, вследствие чего используются или

драйвера упрощенной конструкции с высоким коэффициентом пульсации, или драйвера с высокой степенью миниатюризации без пульсации, которые стоят очень дорого;

- в связи с малым сроком эксплуатации этого типа ламп, нет достоверной статистики о реальной надежности, есть только теоретические расчеты;
- для ФСЛ принципиально использование стеклянной колбы, так что, в отличие от других типов светодиодных ламп, они не являются небьющимися.

#### 1.4 Обзор схем источников питания для светодиодных устройств

На рисунке 8 представлена общая классификация источников питания, применяемых в осветительных устройствах. [5]

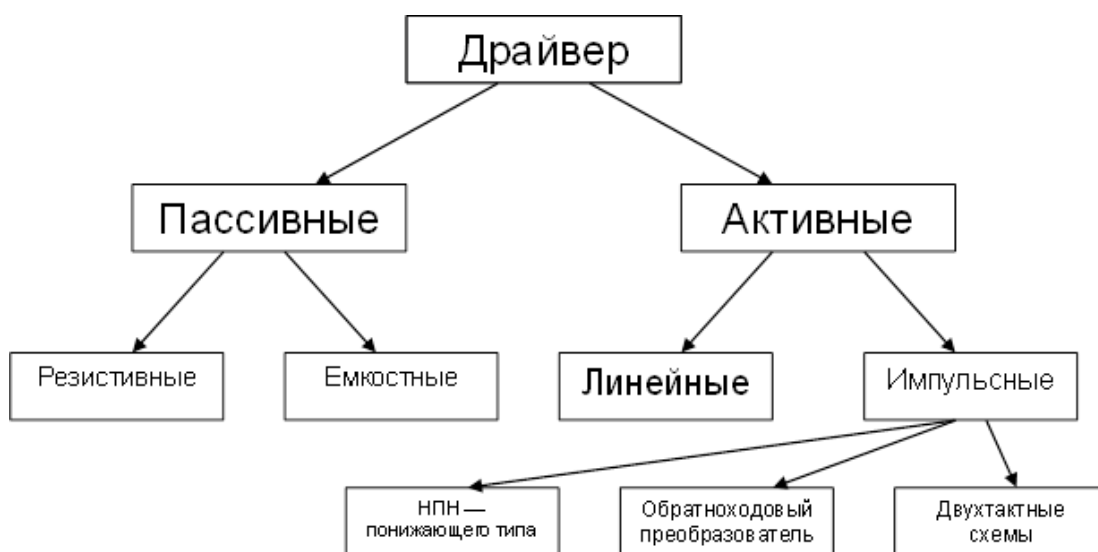


Рисунок 8 – Классификация светодиодных драйверов

В светодиодных лампах, как правило, используются активные драйверы. Рассмотрим более подробно схемы из вышеприведенной классификации.

*Активные источники питания.*

Активные драйверы по способу стабилизации делится на две большие группы: линейные и импульсные. Ввиду больших значений токов в осветительных приборах линейные стабилизаторы не нашли широкого

применения из-за низкой эффективности. Они в основном применяются для питания сверхъярких светодиодов, например, в экранах, табло, для подсветки различных устройств. В осветительных приборах применяются в основном импульсные стабилизаторы, использование которых позволяет достичь КПД 95...98% в широком диапазоне входных/выходных напряжений.

#### *Линейный стабилизатор.*

Линейный стабилизатор (рисунок 9) является делителем напряжения постоянного тока.

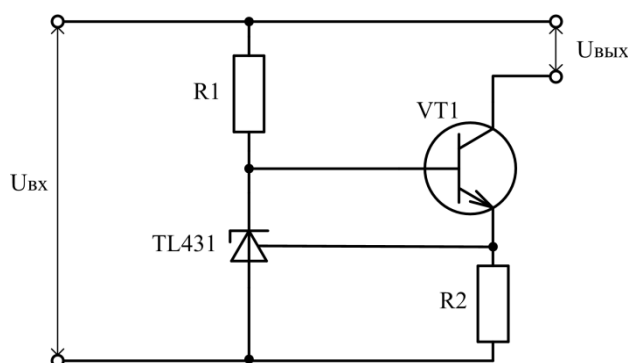


Рисунок 9 – Схема линейного стабилизатора тока

Суть его работы заключается в том, что на вход подается нестабильное напряжение ( $U_{вх}$ ), а с нижнего контакта снимается фиксированное выходное напряжение ( $U_{вых}$ ). Принципиально такого рода стабилизация осуществляется благодаря изменению сопротивления одного из плеч делителя напряжения, в роли которого выступает биполярный транзистор (VT1). Эта система регулирует сопротивление в динамическом заданном диапазоне для стабилизации выходного напряжения.

При достаточно большом отношении входного и выходного напряжений значительно сокращается КПД стабилизатора напряжения, так как энергия рассеивается в виде тепла на транзисторе стабилизатора. По этим причинам в рассматриваемом устройстве особое внимание необходимо уделить вопросам охлаждения, обеспечивая тем самым безопасную и бесперебойную работу стабилизатора напряжения, увеличивая срок службы и предотвращая регулирующий элемент стабилизатора от перегрева.

Главными достоинствами линейных стабилизаторов напряжения являются отсутствие помех в выходном сигнале и простое конструктивное исполнение.

### *Импульсный стабилизатор.*

В импульсном стабилизаторе напряжения регулирующий элемент работает в ключевом режиме, то есть большую часть времени он находится либо в режиме отсечки, когда его сопротивление максимально, либо в режиме насыщения — с минимальным сопротивлением, а значит может рассматриваться как ключ. Плавное изменение напряжения происходит благодаря наличию интегрирующего элемента: напряжение повышается по мере накопления им энергии и снижается по мере отдачи её в нагрузку. Такой режим работы позволяет значительно снизить потери энергии, а также улучшить массогабаритные показатели.

Прямоходовые стабилизаторы образуют большое семейство топологий импульсных источников энергии. На рисунке 10 изображен понижающий прямоходовой преобразователь. [1]

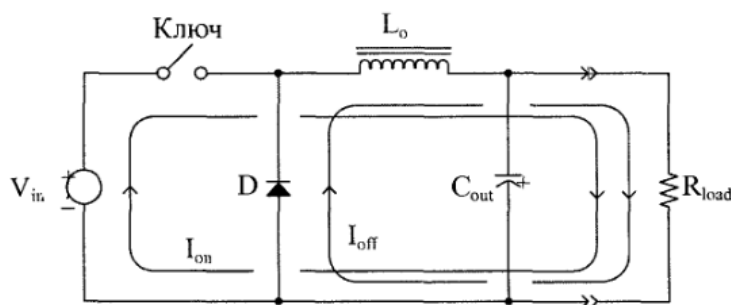


Рисунок 10 – Прямоходовой понижающий преобразователь

Рассмотрим более подробно принцип работы данной схемы. LC-фильтр сохраняет энергию между силовыми импульсами драйвера. На вход LC-фильтра подается срезанное входное напряжение  $V_{in}$ . Фильтр выполняет вольт-временное усреднение колебаний входного напряжения, модулированной по рабочему циклу. Выходное напряжение поддерживается схемой управления путем изменения рабочего цикла. Преобразователь

является понижающим, так как выходное напряжение должно быть ниже входного. Диаграммы работы данного преобразователя приведены на рисунке 11.

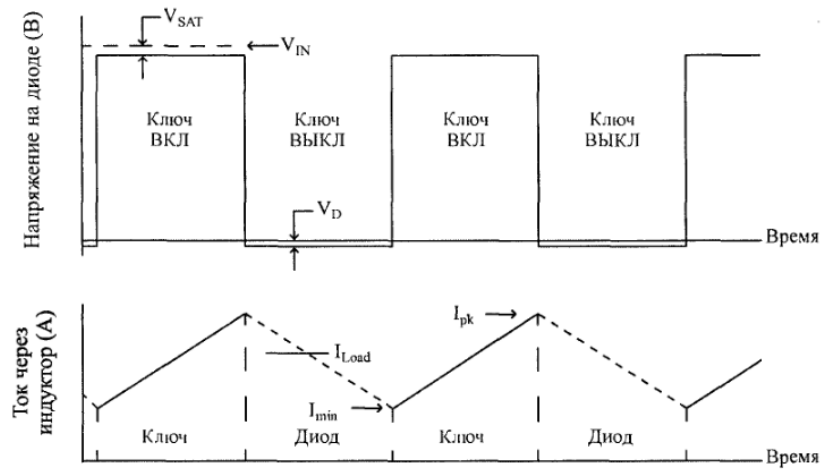


Рисунок 11 – Форма волны напряжения и кривая тока для прямоходового (понижающего) преобразователя

Когда «ключ» замкнут, входное напряжение  $V_{in}$  подается на вход LC-фильтра. Ток через индуктор линейно повышается. Энергия запасается в индукторе и сохраняется магнитным потоком внутри материала сердечника. Когда «ключ» разомкнут, выходное напряжение стремится упасть ниже уровня земли, и диод D, называемый ограничивающим диодом, становится прямосмещенным. Он продолжает проводить ток  $I_{off}$ , который прежде протекал через «ключ», и часть сохраненной энергии разряжается на нагрузку. Это формирует локальную токовую петлю, состоящую из диода, индуктора и нагрузки. Когда «ключ» замыкается, то диод запирается, и ток протекает через входной источник питания и «ключ».

Преимуществами прямоходовых преобразователей являются низкие значения размаха напряжения пульсации, а также обеспечение более высоких уровне выходной мощности.

Другим видом преобразователей является повышающий преобразователь, схема которого приведена на рисунке 12.

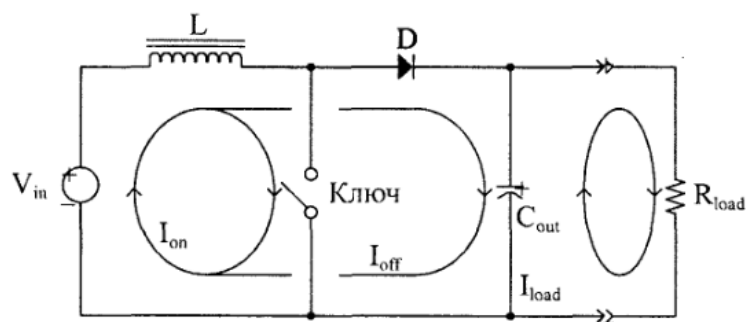


Рисунок 12 – Повышающий преобразователь

Когда «ключ» замкнут, создается токовая петля, состоящая только из индуктора  $L$ , «ключа» и источника входного напряжения  $V_{in}$ . В течение этого периода диод  $D$  обратнo-смещенный, а кривая тока, протекающего через индуктор  $L$ , также имеет положительный линейный наклон. Энергия хранится в магнитном потоке внутри материала сердечника индуктора. Когда «ключ» размыкается, напряжение на индукторе  $L$  возвращается к уровню входного напряжения  $V_{in}$ . Диод  $D$  сразу же становится прямо смещенным, когда напряжение индуктора  $L$  превышает выходное напряжение. Затем напряжение индуктора  $L$  фиксируется на величине выходного напряжения. Этот уровень напряжения, называемый напряжением обратного хода, равен выходному напряжению плюс одно падение прямого напряжения на диоде  $D$ . Когда магнитный поток сердечника полностью исчезает до наступления следующего цикла, то такой режим работы называется прерывистым. Если же энергия опустошается не полностью, то режим называется непрерывным. На рисунке 13 изображены диаграммы работы повышающего преобразователя.

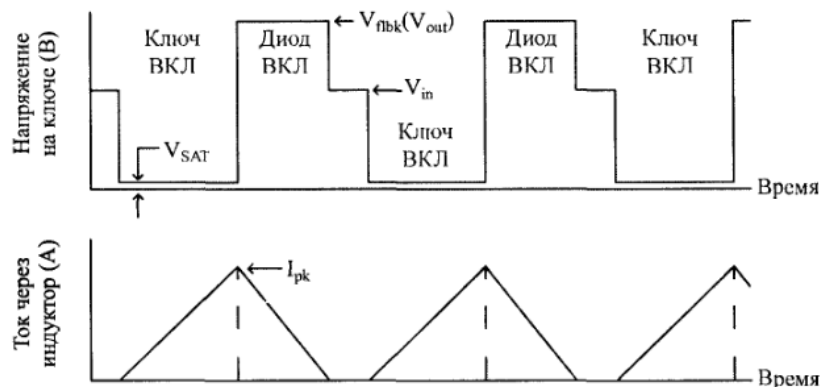


Рисунок 13 – Форма волны напряжения ( $U$ ) и кривая тока ( $I_{pk}$ ) для повышающего преобразователя

Следующей топологией являются обратноходовые преобразователи.

Обратноходовой преобразователь (англ. Flyback converter) - это простая схема включения, которая может быть использована для постоянного напряжения или постоянного тока. Использование двух или более обмоток в индукторе обеспечивает гальваническую развязку.

Принцип работы такого преобразователя приведен на рисунке 14.

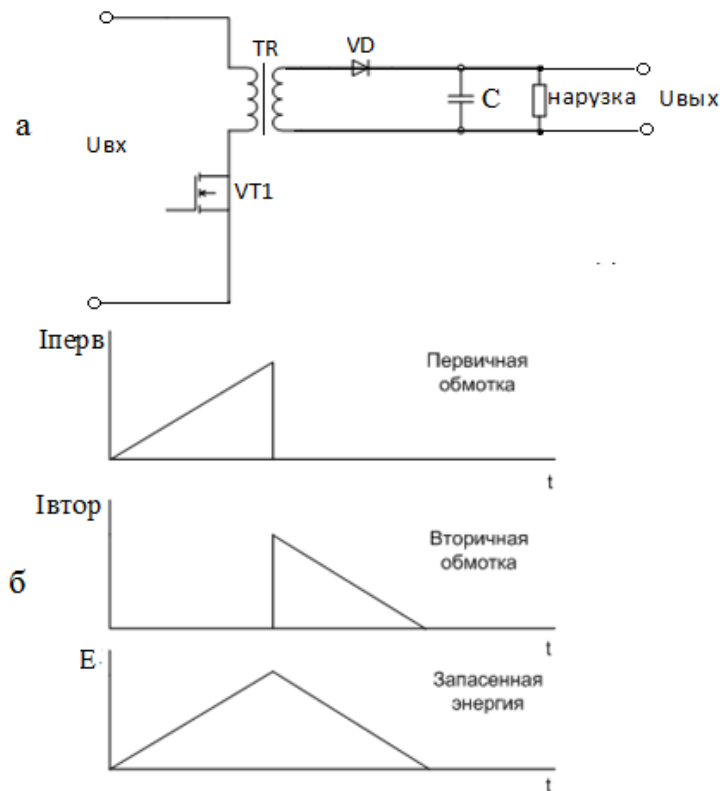


Рисунок 14 – Обратноходовой преобразователь:  
а) упрощенная электрическая схема, б) временные диаграммы работы

Традиционный flyback преобразователь использует индуктор как минимум с двумя обмотками (трансформатор). Рассмотрим две обмотки: одна является основной, которая соединена с входной цепью источника питания и подключается к общему проводу, а другая подключается к нагрузке. Схема устроена так, чтобы магнитная энергия накапливалась в индукторе в течение времени, когда ключ включен, тогда ток увеличивается в первичной обмотке (энергия запасается). Когда ключ разомкнут, магнитная энергия передается на нагрузку.

Преимуществом обратных преобразователей является способность регулировать выходное напряжение в широких пределах, а также поддержание требуемого выходного напряжения при изменении напряжения питающей сети. К недостаткам относится повышенный уровень электромагнитных помех, которые создаются как в питающей сети, так и в нагрузке.



## 2. Разработка источника питания

### 2.1 Разработка элементов структурной схемы

На основе обзора научно-технической литературы разработаем структурную схему источника питания. Существует множество различных схем источников питания. Большинство источников питания постоянного тока строятся по схеме с бестрансформаторным входом, который образован сетевым выпрямителем с фильтром.[1]

Типовая схема источника питания светодиодной лампы представлена на рисунке 15.

Переменное напряжение сети проходит через фильтр электромагнитных помех (ЭМП) на выпрямитель. После чего выпрямленное напряжение проходит через ступень коррекции коэффициента мощности (ККМ) и питает импульсный стабилизатор тока, к выходу которого подключены светодиоды.

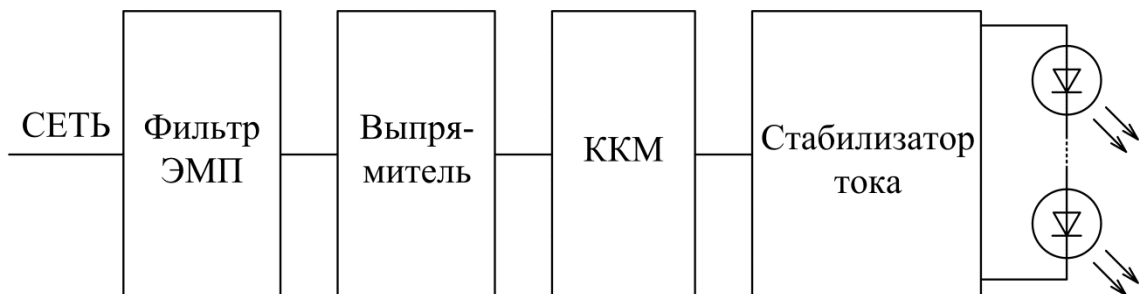


Рисунок 15 – Типовая схема источника питания светильника

Фильтр электромагнитных помех, установленный на входе, позволяет предотвратить попадание высокочастотных импульсных помех не только из сети в источник питания, а также из самого блока питания в сеть.

С учетом мощности и особенностей разработки для ламп со светодиодными линейками схема источника питания примет вид, представленный на рисунке 16.



Рисунок 16 – Структурная схема источника питания для маломощных ламп

### 2.1.1 Разработка выпрямителя

В качестве входного выпрямителя лучше использовать однофазную мостовую схему двухтактного выпрямителя, поскольку используется однофазная сеть, а также данная схема может работать непосредственно от сети без трансформатора и на любой вид нагрузки. Её преимущества по сравнению, например, с однополупериодной одноконтурной схемой [7]:

- выше частота пульсации;
- небольшое обратное напряжение;
- возможность работы без трансформатора, непосредственно от сети;
- отсутствие постоянной составляющей тока, потребляемой от сети.

Схемы работы выпрямителя на активно – ёмкостную и индуктивно ёмкостную нагрузку показаны на рисунке 17.

Вентильный мост содержит две группы вентиля – катодную (нечетные вентили) и анодную (четные вентили). В мостовой схеме ток проводят одновременно два вентиля – один из катодной группы и другой из анодной. В схеме начнет пропускать ток пара вентиля, у которой анод вентиля катодной группы имеет наиболее высокий потенциал, а катод вентиля анодной группы – наиболее низкий потенциал. В течение отрицательной полуволны  $U_{вх}$  катод вентиля VD2 имеет самый маленький потенциал, а анод вентиля VD3 – самый большой потенциал, в связи с этим ток пропускают вентили VD2 и VD3.

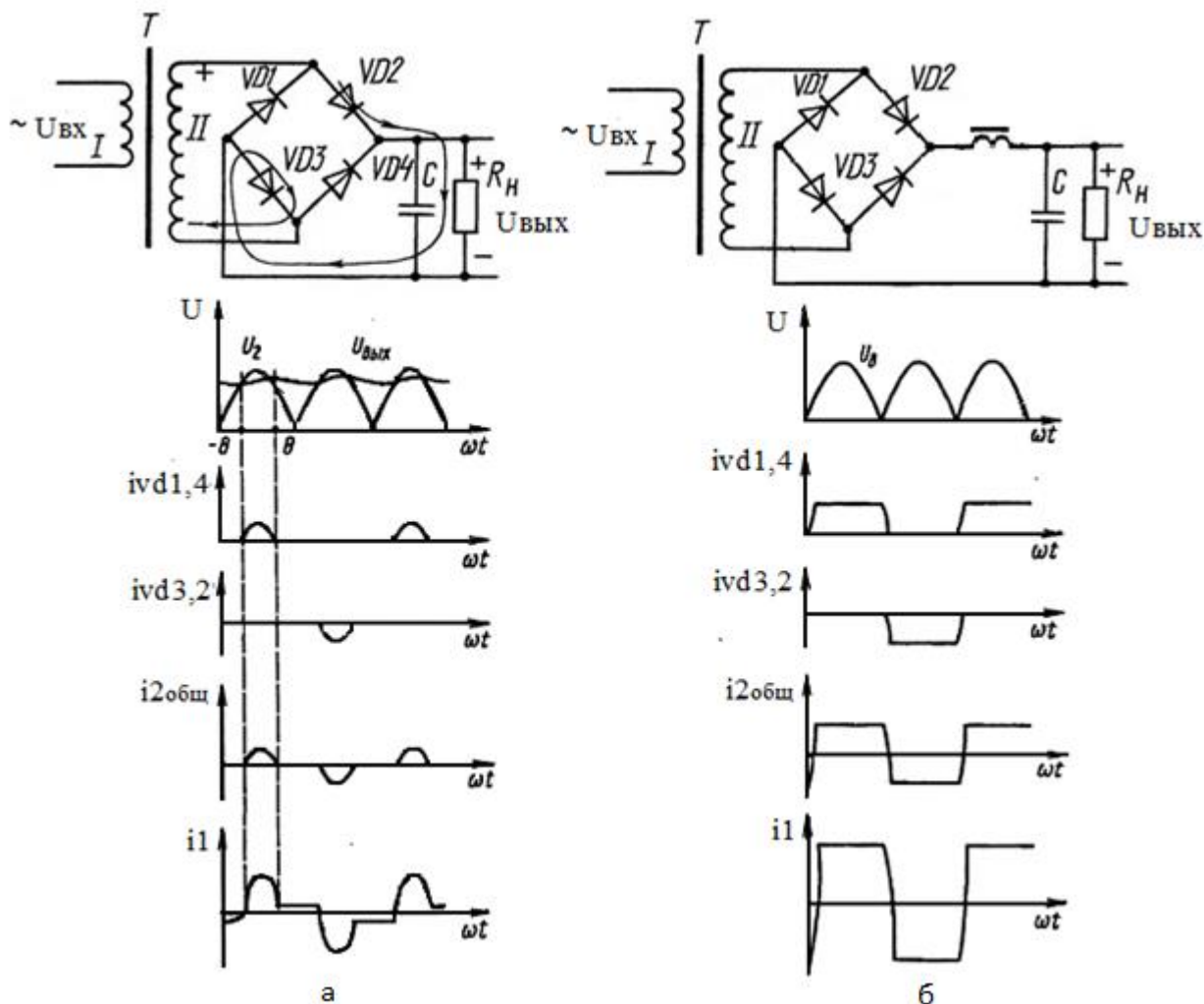


Рисунок 17 – Схемы и диаграммы работы однофазного мостового выпрямителя:

- а - с активно-ёмкостной нагрузкой;
- б - с индуктивно-ёмкостной нагрузкой

### 2.1.2 Разработка фильтра

Сглаживающие фильтры применяются для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения до уровня, который требуется для нормальной работы потребителя. Существуют различные виды фильтров: ёмкостные, Г-образные LC, RC и П-образные CLC и CRC. [8] Ёмкостный фильтр является одним из простых видов сглаживающих фильтров. Он представляет собой конденсатор, включаемый параллельно нагрузке. Такие фильтры

используются при больших значениях сопротивления нагрузки и емкости применяемого конденсатора.

Индуктивно-емкостные фильтры (Г-образные LC и П-образные CLC) нашли широкое применение при больших токах нагрузки, так как падение напряжения на них можно сделать сравнительно небольшим. Эффективность таких фильтров достаточно высокая. Недостатками индуктивно-емкостных фильтров являются: большие габаритные размеры и масса, повышенный уровень электромагнитного излучения от элементов фильтра, относительно высокая стоимость и трудоемкость изготовления.

Резистивно-емкостные фильтры используются при небольших токах нагрузки и коэффициентах сглаживания. Достоинствами этих фильтров являются низкая стоимость, малые габариты и масса. К недостаткам можно отнести относительно большое падение напряжения на фильтре, что приводит к уменьшению эффективности всего устройства.

В качестве фильтра низкочастотных пульсаций сетевого напряжения выберем однозвенный RC-фильтр, как наиболее подходящий в данном применении. В данном случае резистор фильтра будет одновременно выполнять роль предохранителя в случае короткого замыкания, что позволит минимизировать габариты источника.

### **2.1.3 Разработка стабилизатора тока**

Рассмотрев различные схемы драйверов, исходя из требований технического задания, выбираем схему импульсного стабилизатора тока. Данная схема позволяет обеспечить стабильную работу в широком диапазоне напряжений на входе и нагрузке. Так как требования по электробезопасности будут обеспечиваться конструкцией самой лампы, а напряжение в нагрузке ниже напряжения сети, то выбираем схему импульсного последовательного стабилизатора понижающего типа. [9]

Схема данного стабилизатора приведена на рисунке 18.

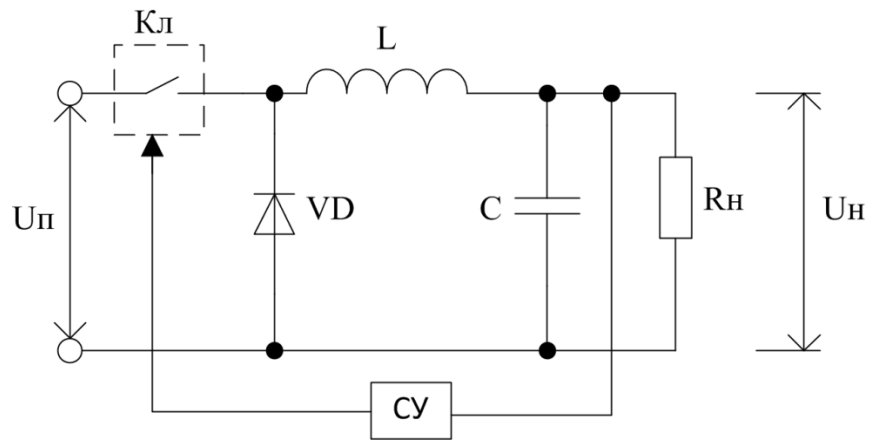


Рисунок 18 – Схема импульсного последовательного стабилизатора понижающего типа

Главная цель схемы управления – это поддерживать выходное постоянное напряжение. В классических схемах для этого используется контур отрицательной обратной связи, где сигнал с выхода считывался контроллером, и на основании полученного сигнала изменялась длительность открытого состояния силового транзистора.

В качестве управляющей выберем микросхему ВР2831 со встроенным силовым транзистором. Схема типового применения микросхемы приведена на рисунке 19. [10]

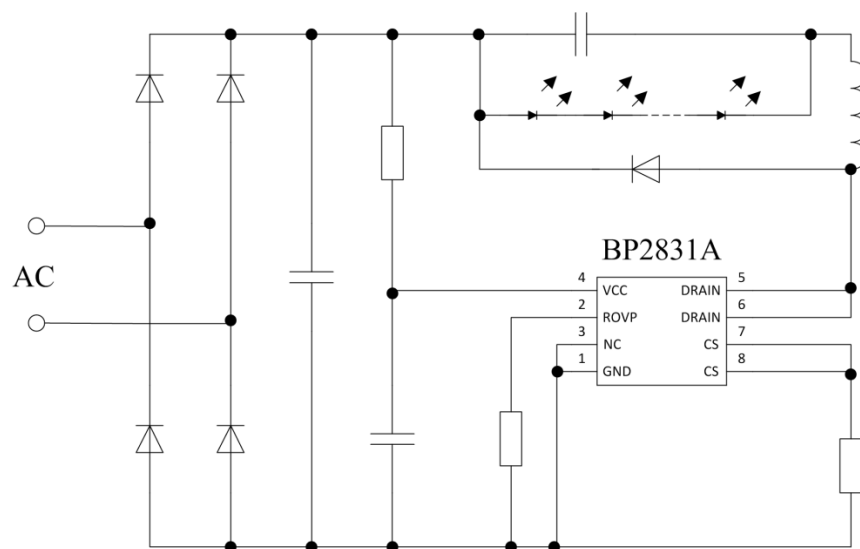


Рисунок 19 – Схема включения микросхемы ВР2831

Данная микросхема является высокоточным понижающим светодиодным драйвером постоянного тока. Устройство работает в режиме

критической проводимости. В ВР2831 интегрирован MOSFET транзистор, благодаря чему рабочий ток очень низкий и нет необходимости в вспомогательной обмотке для питания чипа. Микросхема обладает высокой стабильностью тока при малом количестве компонентов, поэтому стоимость и размер системы минимальны. В ней реализованы функции защиты для повышения надежности системы, такие как защита от короткого замыкания, перенапряжения и функция терморегуляции. Когда цепь нагрузки размыкается, происходит срабатывание защиты от избыточного напряжения. При обнаружении короткого замыкания в цепи светодиодов, система работает на низкой частоте 5 кГц и на выводе CS напряжение снижается до 200 мВ. Таким образом, потребление энергии системой очень маленькое. В случае критических неисправностей, таких как короткое замыкание резистора CS или насыщение индуктора, внутренняя схема обнаружения неисправностей срабатывает и система будет отключена.

После того как система переходит в состояние неисправности, напряжение VCC будет уменьшаться до тех пор, пока не достигнет порогового значения UVLO, после чего система перезапустится заново. Если состояние неисправности удаляется, то система возвращается к нормально работе.

На рисунке 20 представлена маркировка контактов микросхемы ВР2831.

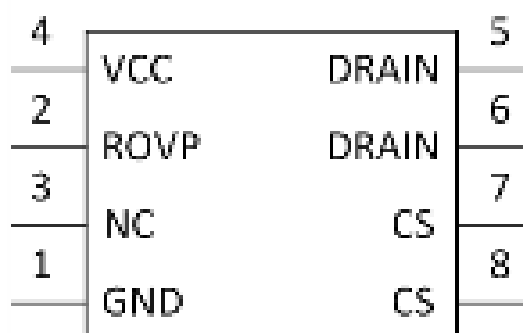


Рисунок 20 – Конфигурация контактов

В таблице 1 приведено описание контактов микросхемы.

Таблица 1 – Назначение выводов микросхемы BP2831

№ контакта	Название	Описание
1	GND	Земля
2	ROVP	Защита от перенапряжения
3	NC	Нет соединения. Должен быть подключен к GND
4	VCC	Силовой питающий контакт
5,6	DRAIN	Внутренний отвод питания MOSFET
7,8	CS	Токочувствительный контакт. Должен быть подключен резистор между этим контактом и GND

На рисунке 21 представлена внутренняя блок-схема микросхемы BP2831.

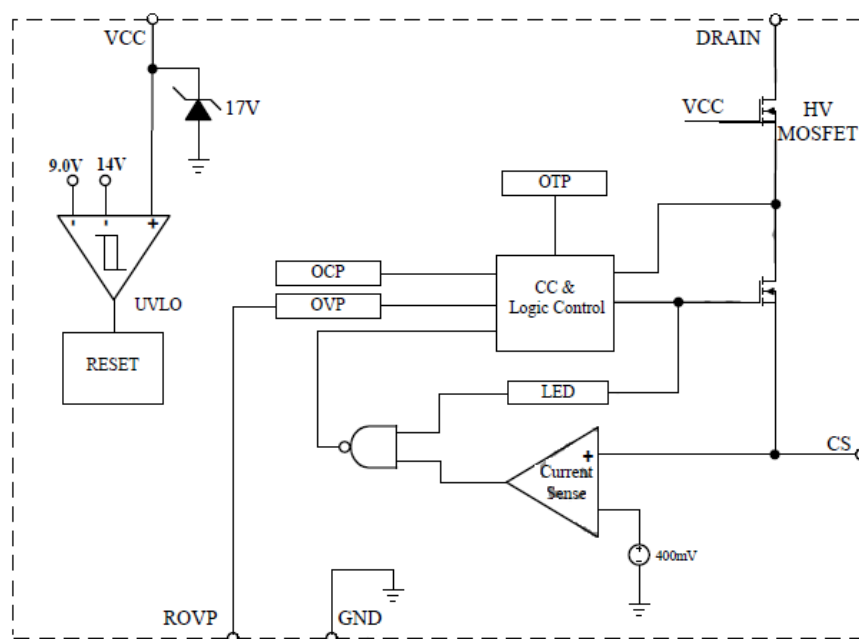


Рисунок 21 – BP2831 внутренняя блок-схема

После подачи питания на контакт VCC конденсатор заряжается. Когда напряжение достигает предельного значения, схема начинает работать.

Встроенный стабилитрон 17V служит для ограничения напряжения на контакте VCC.

## 2.2. Разработка принципиальной схемы драйвера

### 2.2.1. Определение параметров источника питания

Исходные данные для расчета:

- номинальное напряжение питающей сети  $U_c = 220 \text{ В}$ ;
- максимальное напряжение питающей сети  
 $U_{c.\max} = 220 + 220 \cdot 10\% = 242 \text{ В}$ ;
- минимальное напряжение питающей сети  
 $U_{c.\min} = 220 - 220 \cdot 15\% = 187 \text{ В}$ ;
- частота сети  $f_c = 50 \text{ Гц}$ ;
- номинальный ток нагрузки  $I_H = 20 \text{ мА}$ ;
- рабочая частота  $f = 50 \text{ кГц}$ .

Разработка принципиальной схемы драйвера включает в себя расчет: входных диодов выпрямителя; сглаживающего фильтра; стабилизатора тока.

### 2.2.2 Расчет выпрямителя

*Произведем расчёт основных параметров.*

Обратное напряжение  $U_{\text{ОБР}}$ , прикладываемое к диодам моста, рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{ОБР}} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{СЕТИ}}}{0,7} = \frac{1.1 \cdot 1.4 \cdot 220}{0,7} = 484 \text{ В},$$

где  $U_{\text{СЕТИ}}$  - амплитудное значение напряжения сети при превышении напряжения на 10% и с учетом загрузки по напряжению 70%.

Максимальный прямой ток, протекающий через диоды, с учетом КПД стабилизатора тока 70% и загрузки диодов по току 50%, будет равен:

$$I_{\text{МАХ}} = \frac{I_{\text{LED}}}{0,5 \cdot 0,7} = \frac{20}{0,5 \cdot 0,7} = 57 \text{ мА},$$

где  $I_{\text{LED}}$  - ток на нагрузке.

Кроме того для применения в светодиодной лампе диодный мост должен иметь минимальные габариты. На основании рассчитанных данных



выберем диодный мост MB6S [11] с параметрами, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры диодного моста MB6S

$U_{\text{ОБР}}$	600 В
$I_{\text{МАХ}}$	500 мА
Тип корпуса	soic-4

Как видно из таблицы диодный мост выбран с запасом, что положительно повлияет на увеличение срока службы.

### 2.2.3. Расчет фильтра

Значение сопротивления резистора фильтра будем выбирать из следующих соображений: чем больше значение сопротивления резистора, тем больше на нем потери и тем меньше значение пускового тока через выпрямитель. Считая разряженный конденсатор коротким замыканием, и принимая максимально допустимый ток через выпрямитель равный 10А рассчитаем значение сопротивления резистора:

$$R = \frac{1,1\sqrt{2}U_{\text{СЕТИ}}}{I_{\text{МАХ}}} = \frac{1,1 \cdot 1,4 \cdot 220}{10} = 34,22 \text{ Ом.}$$

Выбираем резистор NFR25 сопротивлением 33 Ома производства Vishay Components.[12]

Емкость конденсатора фильтра  $C$  можно определить по формуле, задавшись значением  $K_{\text{ПН}} = 0,2$  [8]:

$$C = \frac{1}{2mfR_{\text{H}} \cdot K_{\text{ПН}}} = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 0,2} = 3,2 \text{ мкФ,}$$

где  $f$  - частота входного переменного напряжения;

$m=2$ - для однофазного двухполупериодного и мостового выпрямителей;

$R_{\text{H}}$  - сопротивление нагрузки;

$K_{\text{ПН}}$  - коэффициент пульсаций напряжения на выходе выпрямителя.

Выбираем конденсатор 4,7 мкФ 400В типоразмером 8X12 мм производства WKKC.[13]

### 2.2.4 Расчет стабилизатора тока

На рисунке 22 представлен проектируемый источник питания в виде

“черного ящика” с параметрами, приведенными в пункте 2.2.1.

Далее будет проведен расчет входных и выходных параметров “черного ящика”. [1]



Рисунок 22 – Представление источника питания как “черный ящик”

Выходная мощность:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \sum_{m=1}^n (U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_n) = 150 \cdot 0,02 = 3 \text{ Вт},$$

где  $I_n$  - номинальный ток нагрузки;

$U_{\text{ВЫХ}}$  - выходное напряжение.

Входная мощность:

$$P_{\text{ВХ}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\eta} = \frac{3}{0,75} = 4 \text{ Вт}.$$

Номинальный ток при напряжении питания 220 В:

$$I_{\text{ВХ.НОМ}} = \frac{P_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ.НОМ}}} = \frac{4}{220} = 0,018 \text{ А},$$

где  $U_{\text{ВХ.НОМ}}$  – величина входного напряжения.

Наибольший ток при отклонении напряжения питающей сети от номинального в меньшую сторону:

$$I_{\text{ВХ.МАХ}} = \frac{P_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ.МИН}}} = \frac{4}{187} = 0,021 \text{ А}.$$

Входной пиковый ток:

$$I_{\text{ПИК}} = \frac{k \cdot P_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ.МИН}}} = \frac{1,4 \cdot 3}{187} = 0,02 \text{ А},$$

где  $k_1 = 1,4$  – оценочный коэффициент пикового тока в понижающем преобразователе.

Определим пиковый ток катушки:

$$I_{PK} = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ А.}$$

Индуктивность определим по формуле:

$$L = \frac{U_n \cdot (U_c - U_n)}{f \cdot I_{PK} \cdot U_c} = \frac{150 \cdot (220 - 150)}{50000 \cdot 0,04 \cdot 220} = 0,024 \text{ Гн,}$$

где  $U_n$  - напряжение на нагрузке;

$U_c$  - напряжение сети;

$f$  - рабочая частота.

Сопротивление токочувствительного резистора:

$$R_{CS} = \frac{400}{I_{PK}} = \frac{400}{0,04} = 10 \text{ кОм,}$$

Когда питание МОП-транзистора включено, ток в катушке увеличивается, тогда время включения транзистора определим по формуле:

$$t_{on} = \frac{L \cdot I_{PK}}{U_c - U_n} = \frac{0,024 \cdot 0,04}{220 - 150} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ с,}$$

где  $L$  - индуктивность катушки.

Тогда время выключенного состояния транзистора:

$$t_{off} = \frac{L \cdot I_{PK}}{U_n} = \frac{0,024 \cdot 0,04}{150} = 0,64 \cdot 10^{-5} \text{ с,}$$

### 3. Экспериментальный раздел

По результатам расчета и выбора основных компонентов проектируемого источника питания был собран опытный образец светодиодного драйвера. Для проверки его основных параметров были сняты осциллограммы тока на нагрузке с использованием двухлучевого осциллографа типа LeCroy WA222 (рисунки 23,24).

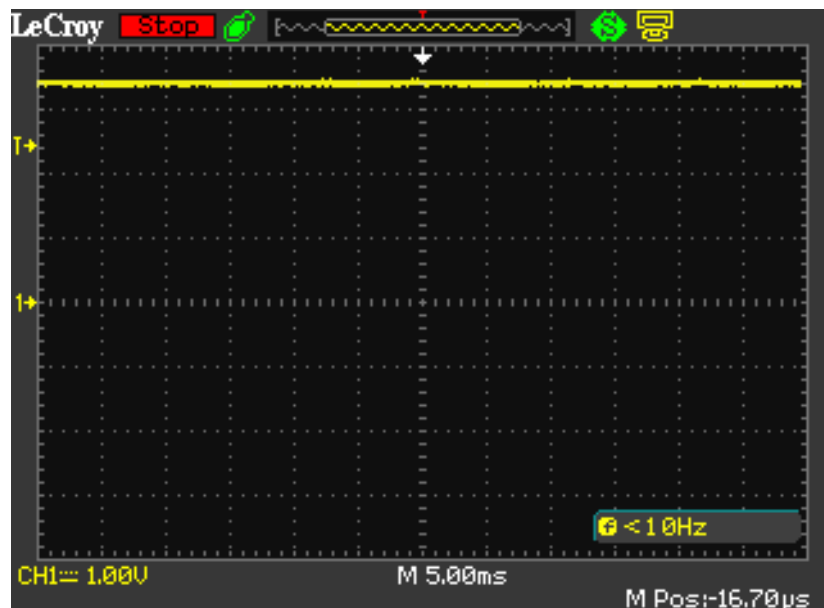


Рисунок 23 – Ток нагрузки

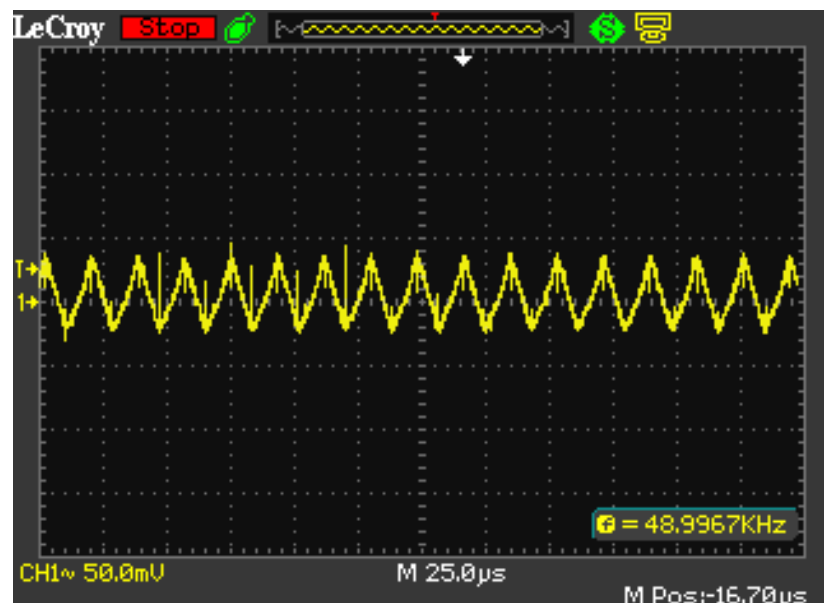


Рисунок 24 – Переменная составляющая тока нагрузки

Полученные осциллограммы позволяют оценить коэффициент пульсаций, который является одной из основных характеристик, определяющих показателей качества искусственного освещения.

На основании данных вышеприведенных осциллограмм проведем расчет коэффициента пульсаций по формуле:

$$k_{\text{пульс.}} = \frac{I_{\text{перем.}}}{I_{\text{наг.}}} = \frac{\frac{U_{\text{перем}}}{R_{\text{ш}}}}{\frac{U_{\text{наг.}}}{R_{\text{ш}}}} = \frac{U_{\text{перем}}}{U_{\text{наг.}}},$$

где  $I_{\text{перем.}}$  - переменная составляющая тока;

$I_{\text{наг.}}$  - ток нагрузки;

$U_{\text{перем}}$  - переменная составляющая напряжения;

$U_{\text{наг.}}$  - напряжение нагрузки.

По результатам расчета были получены величины:  $U_{\text{перем.}} = 0,05 \text{ В}$ ,  $U_{\text{наг.}} = 3,5 \text{ В}$ . Отсюда коэффициент пульсаций:

$$k_{\text{пульс.}} = \frac{U_{\text{перем.}}}{U_{\text{наг.}}} \cdot 100\% = \frac{0,05}{3,5} \cdot 100\% = 1,42\%.$$

Согласно требованиям, отраженным в ГОСТ 21106.5—77, коэффициент пульсаций тока источника питания не должен превышать 3%. Проанализировав данные, можно сделать вывод о том, что значение рассчитанного коэффициента пульсаций входит в допустимый предел и полностью соответствует указанным выше требованиям. Это свидетельствует о том, что использование разработанного драйвера в осветительных устройствах позволяет создать качественное искусственное освещение.

## **Заключение**

В ходе исследования был разработан специализированный драйвер светодиодного светильника с излучающими элементами ленточной структуры, принцип действия которого основан на высокочастотном преобразовании энергии.

Спроектирована структурная и рассчитаны элементы принципиальной схемы устройства. Было проведено экспериментальное исследование источника питания с использованием двухлучевого осциллографа типа Lecroy WA222, результат которого показал, что система обеспечивает выполнение требований технического задания.

В ходе работы получен опыт в разработке и расчете электронных схем и оформлении технической документации. Было рассмотрено влияние вредных факторов, электро- и пожаробезопасности, выполнен расчет освещенности.

Также была проведена оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Рассмотрены вопросы планирования и формирования бюджета научных исследований.