

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники
Кафедра электроники и нанoeлектроники.

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой, к.т.н.


Н. Н. Беспалов

«19» 06 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

Автор бакалаврской работы 17.06.2019  В. В. Курнаев

Обозначение бакалаврской работы БР-02069964-11.03.04-10-19

Направление 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Руководитель работы

к.т.н доцент кафедры

электроники и нанoeлектроники


17.06.2019
А. И. Сурайкин

Нормоконтролер


18.06.2019
А. А. Шестеркина

Саранск

2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ

МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники

Кафедра электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой, к.т.н.



Н. Н. Беспалов

«12» // 2018 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

(в форме бакалаврской работы)

Студент Курнаев Вадим Вячеславович

1. Тема: «Разработка устройства питания светодиодных ламп»

Утверждена приказом по МордГУ № 9507 от 12.11.2018г.

2. Срок представления проекта к защите 14.06.2019г.

3. Исходные данные для разработки

3.1 Техническая информация на устройство питания светодиодных ламп.

3.2 Экспериментальный образец устройства питания.

3.3 Оборудование для исследования характеристик устройства питания.

3.4 Разработать и исследовать устройство питания светодиодных ламп.

3.5 Устройство питания светодиодных ламп должно запитываться от сети переменного напряжения и должно обеспечивать питание семи сверхъярких светодиодов со следующими параметрами:

3.5.1 Диапазон напряжения питания: 90 – 250 В (переменное),

- 3.5.2 Число последовательно включенных светодиодов: 7,
- 3.5.3 Прямое падение напряжения на одном светодиоде: 3,6 В,
- 3.5.4 Полное падение напряжения на светодиодах: $U_{LED}=7 \times 3,6=25,2$ В,
- 3.5.5 Номинальная частота работы ШИМ: $f_{SW}=250$ кГц,
- 3.5.6 Номинальный рабочий ток светодиодов: $I_{LED(AVE)}=350$ мА,
- 3.5.7 Изменение тока светодиодов при изменении напряжения питания (обычно от 15 % до 30 % относительно $I_{LED(AVE)}$): $\Delta i=0,3 \times 350=105$ мА,
- 3.5.8 Число каскадов корректора фазы N_{PFC} (1, 2 или 3): выберем $N_{PFC}=2$,
- 3.5.9 Минимальное значение КПД: 80 %.

4. Содержание выпускной квалификационной работы:

Реферат

Список сокращений и обозначений

Сокращения:

УП – устройство питания;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ИС – интегральная схема;

КПД – коэффициент полезного действия;

LED – сверхъяркий светодиод;

ISNS – вход напряжения датчика тока;

FLTR2 – выход источника опорного напряжения управляющей ИС;

Обозначения латинские

C – внешний навесной конденсатор;

R – внешний навесной резистор;

L – дроссель;

VT – внешний навесной транзистор;

VD – внешний навесной диод.

4.1 Введение

4.2 Основы построения и характеристики источников питания для светодиодных ламп.

4.3 Схемотехника источников питания светодиодных ламп.

- 4.4 Алгоритм работы источника питания светодиодных ламп.
- 4.5 Расчёт основных параметров источника питания светодиодных ламп.
- 4.6 Схема импульсного источника питания светодиодных ламп.
- 4.7 Заключение
- 4.8 Список используемых источников
5. Перечень графического материала:
- чертеж печатной платы;
 - сборочный чертеж платы;
 - перечень элементов;
 - электрическая принципиальная схема;
6. Приложения.
- 6.1 Схема электрическая принципиальная источника питания.
- 6.2 Чертеж печатной платы.
- 6.3 Сборочный чертеж платы.
- 6.4 Перечень элементов.

Руководитель проекта

Задание принял к исполнению




А. И. Сурайкин

В. В. Курнаев

РЕФЕРАТ

Выпускная работа содержит 36 листов, 13 рисунков, 10 источников, 3 приложения.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ, СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА.

Цель работы – разработка и исследование устройства питания светодиодных ламп.

В процессе работы был разработан и исследован импульсный источник питания для светодиодных ламп.

В результате проведенной работы были разработаны: схема электрическая принципиальная импульсного источника питания для светодиодных ламп, топология печатной платы макетного образца источника питания. Изготовлен макет источника питания для светодиодной лампы.

Данный источник питания или устройство питания (УП) обладает следующими конструктивными и технико-эксплуатационными характеристиками: диапазон положительного напряжения питания $+U_p = 3,4-9,3$ В, диапазон отрицательного напряжения питания $-U_p = 1,4-8,6$ В, диапазон тока нагрузки $I_n = 0,3-1,1$ А, длительность положительного импульса $T_+ = 0,2$ мкс, длительность отрицательного импульса $T_- = 2$ мкс.

Разработанное устройство может быть применено в любых сферах использования светодиодных светильников.

Эффективность схемы определяется его простотой изготовления и низкой стоимостью компонентов, входящих в нее. Можно сделать вывод, что в процессе работы удалось создать бюджетный вариант устройства, для большинства светодиодных светильников бытового и промышленного назначения, также для сферы ЖКХ.

<i>БР – 02069964 – 11.03.04 – 10– 19</i>								
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Разработка устройства питания светодиодных ламп</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Курнаев В. В.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>17.06.2019</i>				
<i>Провер.</i>		<i>Сурайкин А. И.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>17.06.2019</i>			5	36
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шестёркина А. А.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>18.06.19</i>		<i>МГУ им. Н.П. Огарёва ИЭС ЭНЭ 411 гр.</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Беспалов Н. Н.</i>	<i>[Подпись]</i>	<i>19.06.19</i>				

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Основы построения и характеристики источников питания для светодиодных ламп	9
2 Схемотехника источников питания светодиодных ламп	10
3 Алгоритм работы источника питания светодиодных ламп	14
4 Расчёт основных параметров источника питания светодиодных ламп	18
5 Схема импульсного источника питания светодиодных ламп	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	31
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Схема электрическая принципиальная	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Эскиз печатной платы УП	35
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Сборочный чертеж	36

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

ВВЕДЕНИЕ

Светодиодные осветительные приборы всё больше проникают в нашу жизнь. При этом концептуальные решения светильников самые разнообразные, начиная от решений, соответствующих традиционным светильникам на люминесцентных лампах и, заканчивая, совершенно новыми системами освещения. В настоящее время достаточно большой номенклатурный диапазон начинают занимать светодиодные светильники, предназначенные для прямой замены ламп накаливания и компактных люминесцентных ламп, то есть так называемые светодиодные лампы с цоколем E27. Такая светодиодная лампа вкручивается в стандартный патрон лампы накаливания [1].

Для решения задачи разработки светодиодной лампы на базе существующих корпусов, необходимо устройство питания (УП). Для получения светового потока в 800 лм, аналогичного потоку лампы накаливания мощностью 40-60 Вт, необходимо управлять 7 светодиодами, мощностью не менее 1 Вт с номинальной светоотдачей не ниже 100 лм/Вт при рабочем токе 350 мА

При разработке светодиодной лампы встает вопрос об отводе тепла, выделяющегося в малом объёме, так как перегрев светодиодов нежелателен. Источником тепла в светодиодном светильнике, кроме самих светодиодов является устройство питания. К УП предъявляются жёсткие требования:

- гальваническая изоляция светодиодов от сети,
- высокий КПД,
- малые габариты, обеспечивающие возможность встраивания в корпус лампы,
- низкая себестоимость в массовом производстве

Одним из возможных вариантов реализации светодиодной лампы, как говорилось ранее, может быть вариант корпуса с цоколем E27 (рис. 1).

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7



Рисунок 1 – Корпус светодиодной лампы с цоколем E27

Несколько подробнее необходимо сказать о гальванической развязке светодиодов. Запретов на использование устройств питания без гальванической изоляции нагрузки нет. Согласно ГОСТ МЭК 598 «Светильники. Общие требования и методы испытаний» светильники подразделяются на три класса по защите от поражения электрическим током [2].

Если светодиоды размещать на печатной плате с алюминиевым основанием, то вполне возможна реализация УП без гальванической развязки. Производители печатных плат на алюминиевом основании гарантируют электрическую прочность на уровне 1,5-3,0 кВ. Однако на практике это не всегда так. В этой связи, предпочтение следует отдавать УП с гальванической изоляцией, но и не следует забывать об УП без гальванической развязки, если обеспечивается необходимый уровень электрической прочности материала.

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1 Основы построения и характеристики источников питания для светодиодных ламп

Исходя из общих требований к УП для светодиодных светильников, а также учитывая особенности их применения сферах жилищно-коммунального хозяйства, быта, промышленных предприятий технические требования к устройствам питания светодиодных ламп можно представить следующим образом:

- Рабочий диапазон напряжения питания: 90-230 В (переменное),
- Световой поток: 400 лм, 800 лм, 1200 лм,
- Ток питания светодиодов: 350 мА.

Еще одним требованием, предъявляемым к УП светодиодных ламп, может выступать так называемая функция диммирования [3], которая по своей сути есть функция управления яркостью. Данная функция, может быть и не заслуживала бы внимания, но в современных условиях энергосбережения владельцы офисов, торговых и промышленных объектов идут на дополнительные финансовые расходы ради снижения расходов на электроэнергию. С появлением светодиодных источников света, многие фирмы-производители электронной компонентной базы стали выпускать ИС для построения УП, способных изменять значение выходного тока под воздействием симисторного диммера (рис. 2). Управление яркостью в более широком диапазоне (от 0 до 100 %) можно получить, если в УП, в управляющей ИС предусмотрена функция управления внешним сигналом с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

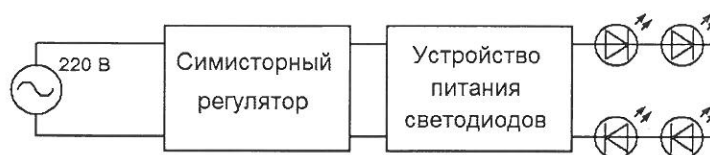


Рисунок 2 – Применение симисторного регулятора совместно с УП светодиодов

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

2 Схемотехника источников питания светодиодных ламп

Как известно, в качестве УП светодиодных светильников вообще и светодиодных ламп в частности широко используются импульсные источники питания [4]. Схемотехника их построения достаточно известна. Но вместе с тем, существует много технических вопросов, связанных с реализацией конкретных технических характеристик, таких как:

- выбор принципиального схемотехнического решения (изолированное УП или нет),
- вид нагрузки (количество светодиодов, тип светодиодов, рабочий ток светодиодов),
- высокий КПД (не менее 80 %),
- высокий коэффициент мощности (если мощность нагрузки более 25 Вт, то не менее 95 %),
- наличие защиты (нескольких защит),
- возможность расширения функций,
- возможность внешнего управления (диммирования) уровнем освещённости.

Это переченъ можно было бы продолжать, но в силу того, что всегда существует некоторый минимальный (базовый) перечень требований, реализация которых принципиально важна с точки зрения получения необходимого качества. В соответствии с этим, вышеперечисленный набор требований будем считать базовым для реализации УП для светодиодной лампы.

В связи с тем, что реализация современного высокоэффективного, конкурентоспособного УП невозможна без применения ИС импульсных источников питания, то важен выбор наиболее подходящей ИС. Практически все ведущие фирмы-производители электронной компонентной базы (ЭКБ) выпускают управляющие ИС для импульсных источников питания. Номенклатура таких ИС огромна и выбор, как правило, связан с определением отношения – цена/требуемые характеристики. В этой связи интерес представляет

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

такая ИС, как LM3445. Эту ИС выпускают две известные фирмы – National Semiconductor и Texas Instruments (обе из США). Данная ИС практически неизвестна в России и информацию по её характеристикам, и её применению невозможно найти в отечественной литературе. Как мы выяснили, ИС LM3445 [4, 5] обладает весьма широким набором функций, позволяющим гибко реализовывать различные УП для большинства светодиодных светильников бытового и промышленного назначения, также для сферы ЖКХ.

Интегральный драйвер LM3445 ориентирован для управления мощными светодиодами, используемыми в устройствах промышленного и бытового освещения. Основным отличием этой микросхемы от подобных является возможность управления яркостью светодиодов при помощи внешнего тиристорного регулирования. Эта дополнительная функция позволяет расширить сферу применения светодиодных светильников и эффективно использовать их без дополнительной доработки вместо ламп накаливания в сетях, где уже смонтированы «плавные регуляторы света» (тиристорные регуляторы). На рисунке 3 приводится структурная схема микросхемы LM3445.

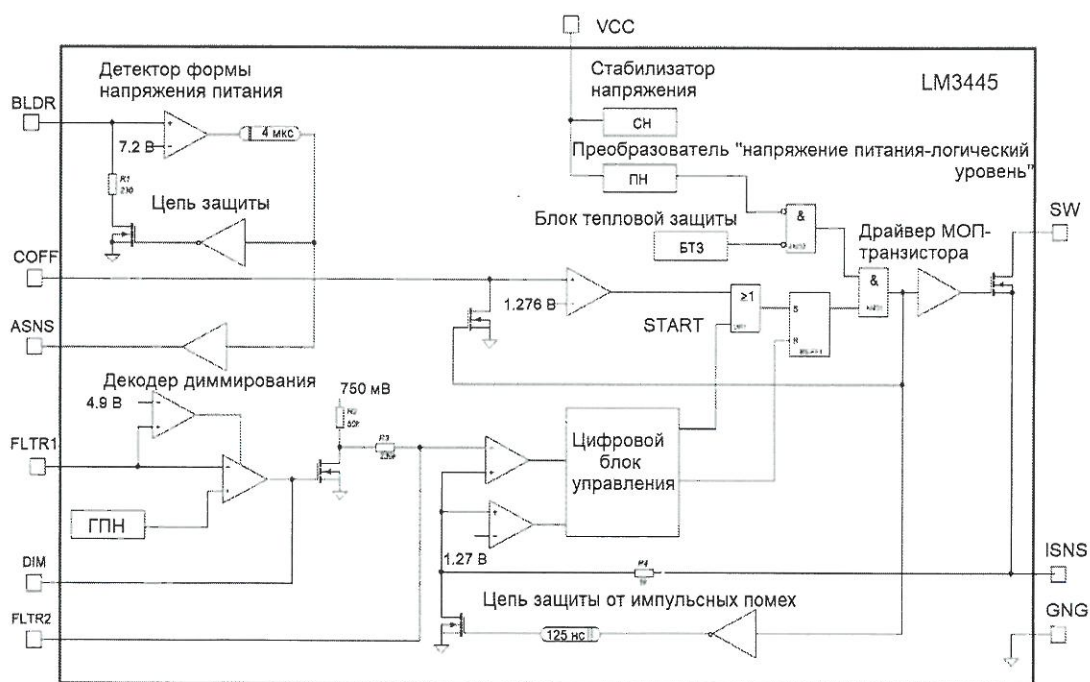


Рисунок 3 – Структурная схема микросхемы LM3445

Основным отличием микросхемы LM3445 от многих аналогичных, является наличие детектора диммирования, что позволяет плавно управлять интенсивностью светового потока с помощью стандартного внешнего диммера с ШИМ [6].

В связи с тем, что симисторный регулятор изменяет форму напряжения на входе, микросхема драйвера должна отслеживать текущее состояние симистора (открыт/закрыт), для чего в ИС предусмотрена схема детектирования (вывод BLDR является её входом), на выходе которой (вывод ASNS) появляется низкочастотный ШИМ-сигнал с коэффициентом заполнения, пропорциональным времени нахождения димерного симистора в открытом состоянии. В дальнейшем это ШИМ-сигнал подаётся на вывод FLTR1 для генерации высокочастотного ШИМ-сигнала, управляющего работой схемы открытия и закрытия силового ключа (мощного МОП-транзистора).

ИС LM3445 имеет следующие основные характеристики:

- содержит декодер диммированного переменного сигнала источника питания,
- рабочий диапазон напряжения питания от 6,0 до 8,0 В,
- рабочий ток управления светодиодами более 1 А,
- настраиваемая частота ШИМ,
- адаптивная настройка времени выключенного состояния (пазы сигнала ШИМ), обеспечивающая постоянный уровень пульсаций,
- ток питания (в состоянии покоя) не более 3 мА,
- возможность построения УП с гальванической изоляцией нагрузки и без гальванической изоляции,
- стабильный КПД практически во всём диапазоне рабочего напряжения питания,
- наличие тепловой защиты.

Принципиальная электрическая схема УП на основе ИС LM3445, выполненного согласно схемотехнике понижающего преобразователя без гальванической изоляции нагрузки представлена на рисунке 4.

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 Алгоритм работы источника питания светодиодных ламп

Линейные стабилизаторы имеют недостатки поэтому применяются импульсные преобразователи для питания светодиодов и светодиодных модулей.

Импульсные источники питания способны трансформировать напряжение в ток и наоборот. КПД такого источника тока, независимо от величины входного (выходного) напряжения, практически постоянный и составляет, в зависимости от используемых элементов, до 80...95%. Из-за высокого КПД уменьшается тепловой режим УП: элементы в нем почти не греются. Вместо больших радиаторов с вентиляторами можно использовать небольшие пластины или корпуса транзистора достаточно для отведения тепла. Также довольно снижается потребляемый ток, это важный факт для автономной работы УП.

Чем выше рабочая частота преобразователя, тем меньших размеров могут быть его самые габаритные детали — катушка индуктивности (дроссель или трансформатор) и фильтрующие конденсаторы. Образно говоря, за 1 такт сердечник дросселя или трансформатора может накопить небольшое количество энергии определенной величины, и объем не зависит от рабочей частоты. То есть, повысив рабочую частоту, в 10 раз, можно за то же время "передать" в нагрузку в 10 раз большую мощность при том же размере катушки и сердечника. Поэтому, если обычный 50-герцовый трансформатор мощностью 270 Вт (ТС-270) весит более 5 кг, то импульсный трансформатор на 300 Вт, работающий на частоте 30 кГц, размером 5-10 см.

Предел увеличения частоты ограничен: для большинства недорогих ключевых транзисторов максимальная рабочая частота не превышает 100...300 кГц, а у ферритовых сердечников на частотах выше 30...100 кГц значительно увеличиваются потери из-за вихревых токов внутри сердечника. Поэтому оптимальная рабочая частота для импульсного источника тока — 30...50 кГц. Она выше слухового порога человека, поэтому не доставляет

					<i>БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

дискомфорта при нахождении рядом, и потери при этой частоте еще достаточно малы.

Импульсные источники питания имеют ряд недостатков. Главный из них кроется в самом принципе действия. Стабилизатор работает в импульсном режиме и на довольно высокой частоте, поэтому он излучает весьма мощные электромагнитные и электрические (пульсации напряжения) помехи. Избавиться от них очень сложно. Поэтому применять импульсные стабилизаторы целесообразно только там, где нагрузка потребляет значительный ток или мощность (более 10...20 Вт), есть большая разница между входным и выходным напряжениями (минимум в 2...5 раз), а нагрузка сравнительно нечувствительна к помехам и пульсациям (заряжаемый аккумулятор, лампочка, электромотор и др.).

Импульсный стабилизатор состоит из пяти частей:

- Схемы управления;
- Ключевого транзистора;
- Дросселя (катушки индуктивности с магнитным сердечником, чаще ферритовым);
- Фильтрующих конденсаторов;
- Обратного диода, в качестве которого для небольшого увеличения КПД (и значительного уменьшения нагрева корпуса) можно использовать мощный транзистор.

В зависимости от того, как соединены эти элементы, импульсный источник питания может повышать, понижать, а также инвертировать полярность напряжения. Также известны трансформаторные импульсные преобразователи, но они менее распространены и используются, в основном, там, где необходима гальваническая развязка (блоки питания, зарядные устройства с питанием от сети, источники питания для светодиодных ламп).

Схемы управления современных импульсных источников питания собирают на базе специализированных микросхем. Они сравнительно недороги

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

обладают отличными характеристиками и практически не требуют подключения внешних элементов и точной настройки. Для управления полевыми транзисторами необходимы микросхемы с мощными выходами: для достижения максимального КПД транзистор должен быстро открываться (за время порядка сотен наносекунд), а у полевых транзисторов емкость затвора очень большая. Поэтому микросхема-драйвер полевого транзистора должна иметь полу мостовой выход, способный обеспечить ток 0,2...2,0 А. Чем выше рабочая частота, тем большим должен быть выходной ток. Этот ток потребляется транзистором кратковременно (пока не зарядится или разрядится емкость затвора), а все остальное время ток не потребляется. Поэтому более мощный драйвер не приведет к увеличению энергопотребления, а наоборот, КПД схемы только возрастет

Схема повышающего преобразователя напряжения показана на рисунке 5 а. Во время рабочего хода, когда транзистор открыт, катушка запасает энергию. Ее можно представить как батарейку (конденсатор), положительный полюс которой — вверху схемы рисунок 5 б. Диод при этом закрыт, постоянное напряжение на выходе поддерживается конденсатором. После за-пириания транзистора полярность напряжения на выводах катушки из-за ЭДС самоиндукции меняется на противоположную, она суммируется с напряжением питания и через открывшийся диод подзаряжает конденсатор (рисунок 5 в) . Таким способом, можно получить сколь угодно большое напряжение, но обычно оно не превышает несколько сотен вольт из-за потерь, как в самой катушке, так и в других элементах схемы.

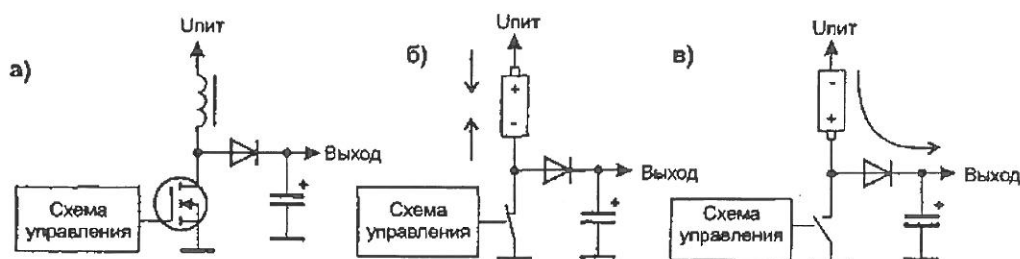


Рисунок 5 – Схема повышающего преобразователя

При сборке такой схемы нужно уделить особое внимание надежности элементов и монтажа. Транзистор, конденсатор и диод в этой схеме должны быть рассчитаны на максимальное выходное напряжение плюс 10...20В запаса.

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4 Расчёт основных параметров источника питания светодиодных ламп

С учётом специфики работы импульсных источников питания с ШИМ [4], произведём расчёт режима работы ИС LM3445, а также ряда её внешних навесных компонентов.

В качестве исходных данных для расчёта светодиодной лампы, выберем следующие:

1. Диапазон напряжения питания: 90 – 250 В (переменное),
2. Число последовательно включенных светодиодов: 7,
3. Прямое падение напряжения на одном светодиоде: 3,6 В,
4. Полное падение напряжения на светодиодах: $U_{LED}=7 \times 3,6=25,2$ В.

Начальный режим работы ИС LM3445:

1. Номинальная частота работы ШИМ: $f_{SW}=250$ кГц,
2. Номинальный рабочий ток светодиодов: $I_{LED(AVE)}=350$ мА,
3. Изменение тока светодиодов при изменении напряжения питания (обычно от 15 % до 30 % относительно $I_{LED(AVE)}$): $\Delta i=0,3 \times 350=105$ мА,
4. Число каскадов корректора фазы N_{PFC} (1, 2 или 3): выберем $N_{PFC}=2$,
5. Минимальное значение КПД: 80 %.

Коэффициент заполнения импульсного выходного сигнала ШИМ:

$$D = \frac{U_{LED}}{U_{IN}} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = t_{ON} \cdot f_{SW}, \quad (1)$$

где - U_{LED} – полное падение напряжения на светодиодах (25,2 В),

U_{IN} – напряжение питания светодиодов (сформированное AC-DC преобразователем),

t_{ON} – время включенного состояния транзистора VT3 (рис. 3),

t_{OFF} – время выключенного состояния транзистора VT3,

f_{SW} – частота ШИМ.

						Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	

С учётом КПД, коэффициент заполнения можно выразить следующим образом:

$$D = \frac{U_{LED}}{U_{IN}} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

где η – КПД.

Минимальное напряжение U_{IN} с учётом рабочего диапазона и пассивного корректора фазы, можно вычислить с помощью следующей эмпирической формулы:

$$U_{IN(MIN)} = \frac{U_{AC-RMS(MIN)} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\varphi)}{N_{PFC}} \quad (3)$$

где $U_{AC-RMS(MIN)}$ – минимальное значение напряжения питания сети (90 В),

φ – фаза, соответствующая максимальному значению напряжения питающей сети,

N_{PFC} – число каскадов пассивного корректора фазы (в нашем случае 2).

Подставляя известные значения в (3), получим:

$$U_{IN(MIN)} = \frac{90 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(250)}{2} = 59,643 \approx 60 \text{ В.} \quad (4)$$

Максимальное напряжение U_{IN} , соответствующее максимальному рабочему напряжению на стоке транзистора $VT3$, вычисляется следующим образом:

$$U_{IN(MAX)} = U_{DS(MAX)} = U_{AC-RMS(MAX)} \cdot \sqrt{2}, \quad (5)$$

где $U_{AC-RMS(MAX)}$ – максимальное значение напряжения питания сети (250 В).

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Подставляя известные значения в (5), получим:

$$U_{IN(MAX)} = U_{DS(MAX)} = 250 \cdot \sqrt{2} = 352,5 \approx 352 \text{ В.} \quad (6)$$

Частота ШИМ – величина обратная периоду импульсного сигнала:

$$f_{SW} = \frac{1}{t_{OFF} + t_{ON}}, \quad (7)$$

где t_{OFF} – время выключенного состояния транзистора VT3,

t_{ON} – время включенного состояния транзистора VT3.

С учётом соотношения (1) для скважности сигнала ШИМ, выразим частоту ШИМ:

$$f_{SW} = \frac{D}{t_{ON}} \quad \text{или} \quad f_{SW} = \frac{1-D}{t_{OFF}}. \quad (8)$$

Выражая из соотношения (2) отношение U_{LED}/U_{IN} и подставляя его в (8), получим:

$$f_{SW} = \frac{1 - \frac{1}{\eta} \cdot \frac{U_{LED}}{U_{IN}}}{t_{OFF}}. \quad (9)$$

Из соотношения (9) легко выразить время выключенного состояния транзистора VT3 при номинальном значении напряжения U_{IN} :

$$t_{OFF} = \frac{1 - \frac{1}{\eta} \cdot \frac{U_{LED}}{U_{IN}}}{f_{SW}}. \quad (10)$$

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

Подставляя известные значения в (10), получим:

$$t_{OFF} = \frac{1 - \frac{1}{0,8} \cdot \frac{25,2}{220 \cdot \sqrt{2}}}{250 \text{кГц}} = 0,0036 \text{мс} = 3,6 \text{мкс} . \quad (11)$$

На основе соотношений (2) и (8) получим формулу для расчёта времени включенного состояния транзистора $VT3$ (минимальная длительность импульса ШИМ):

$$t_{ON} = \frac{\frac{1}{\eta} \cdot \frac{U_{LED}}{U_{IN}}}{f_{SW}} . \quad (12)$$

Подставляя в (12) численные данные, получим:

$$t_{ON} = \frac{\frac{1}{0,8} \cdot \frac{25,2}{220 \cdot \sqrt{2}}}{250 \text{кГц}} = 0,0004 \text{мс} = 0,4 \text{мкс} . \quad (13)$$

Минимальная длительность импульса $t_{ON(MIN)}$ вычисляется подстановкой в (12) максимального значения выпрямленного напряжения питания $U_{IN(MAX)}$. Проводя вычисления, аналогичные (13), получим $t_{ON(MIN)}=0,25$ мкс, что не выходит за пределы линейной работы ШИМ ИС LM3445 ($t_{ON(MIN)} > 0,2$ мкс).

Для расчёта параметров дросселя $L1$, воспользуемся известными соотношениями, связывающими ток и напряжение на индуктивности [7]. В приближении линейного изменения тока дросселя $L1$ (рис. 6), напряжение на светодиодах при закрытом транзисторе $VT3$ выразим в виде (14).

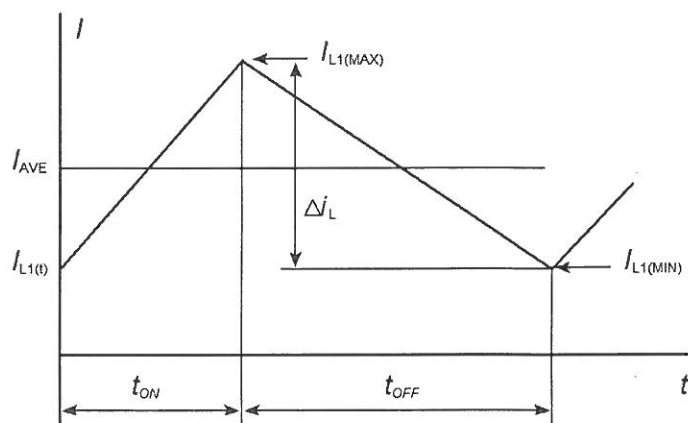


Рисунок 6 – Форма тока, протекающего через дроссель $L1$

$$U_{LED} = L1 \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (14)$$

где Δi – изменение тока дросселя.

При закрытом транзисторе $VT3$, можно принять $\Delta t \approx t_{OFF}$. Тогда после перегруппировки соотношения (14), получим:

$$L1 \approx t_{OFF} \cdot \frac{U_{LED}}{\Delta i}. \quad (15)$$

Подставляя в (15) соотношение (10) для t_{OFF} , получим соотношение для индуктивности дросселя $L1$:

$$L1 = \frac{U_{LED} \cdot \left(1 - \frac{1}{\eta} \cdot \frac{U_{LED}}{U_{IN}}\right)}{f_{SW} \cdot \Delta i}. \quad (16)$$

Подставляя в (16) значения известных и рассчитанных ранее данных, получим $L1 \approx 860$ мкГ.

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

Если выбрать ток коллектора транзистора $VT2$ не более $I_C=50$ мкА, то может быть вычислена величина резистора $R6$: $R6=U_{LED}/I_C=25,2/0,05=504$ к. Выберем $R6=560$ к.

Каскад на транзисторе $VT2$ выполняет функцию защиты ИС и мощного МОП-транзистора в случае короткого замыкания цепи светодиодов. Для задания времени включения защиты ИС (выключения ИС), необходимо рассчитать величину конденсатора $C9$. Следует отметить, что время выключения ИС должно превышать время t_{OFF} . Величина конденсатора $C9$ может быть рассчитана из соотношения:

$$C9 = \frac{t_{OFF} \cdot U_{LED}}{U_{REF} \cdot R6}, \quad (17)$$

где - U_{REF} – внутреннее опорное напряжение ИС LM3445, равное $U_{REF}=1,276$ В [5, 6].

Подставляя в (17) значения всех переменных, получим $C9=127$ пФ, или округляя, выберем $C9=120$ пФ [9].

Для обеспечения требуемого значения коэффициента мощности, в УП присутствует пассивный корректор фазы (элементы $C5$, $C6$, $VD2$, $VD3$, $VD4$). Заметим, что высокое значение коэффициента мощности в УП данной светодиодной лампы не требуется, так как потребляемая мощность лампы не превышает 9 Вт (коэффициент мощности более 0,8 требуется, как правило, в устройствах светодиодного освещения, мощностью более 25 Вт). Но, тем не менее, в данной схеме УП корректор фазы присутствует и обеспечивает коэффициент мощности 0,87. Расчёт элементов схемы пассивного корректора фазы произведён согласно данным, приведённым в [6, 7,10].

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5 Схема импульсного источника питания светодиодных ламп

Аналогичный расчёт был нами произведён для схемы УП с гальванической развязкой [8]. Ввиду громоздкости, мы его здесь не приводим. Принципиальная электрическая схема УП на основе ИС LM3445, выполненного согласно схемотехнике понижающего преобразователя с гальванической изоляцией нагрузки [9, 10] представлена на рисунке 7.

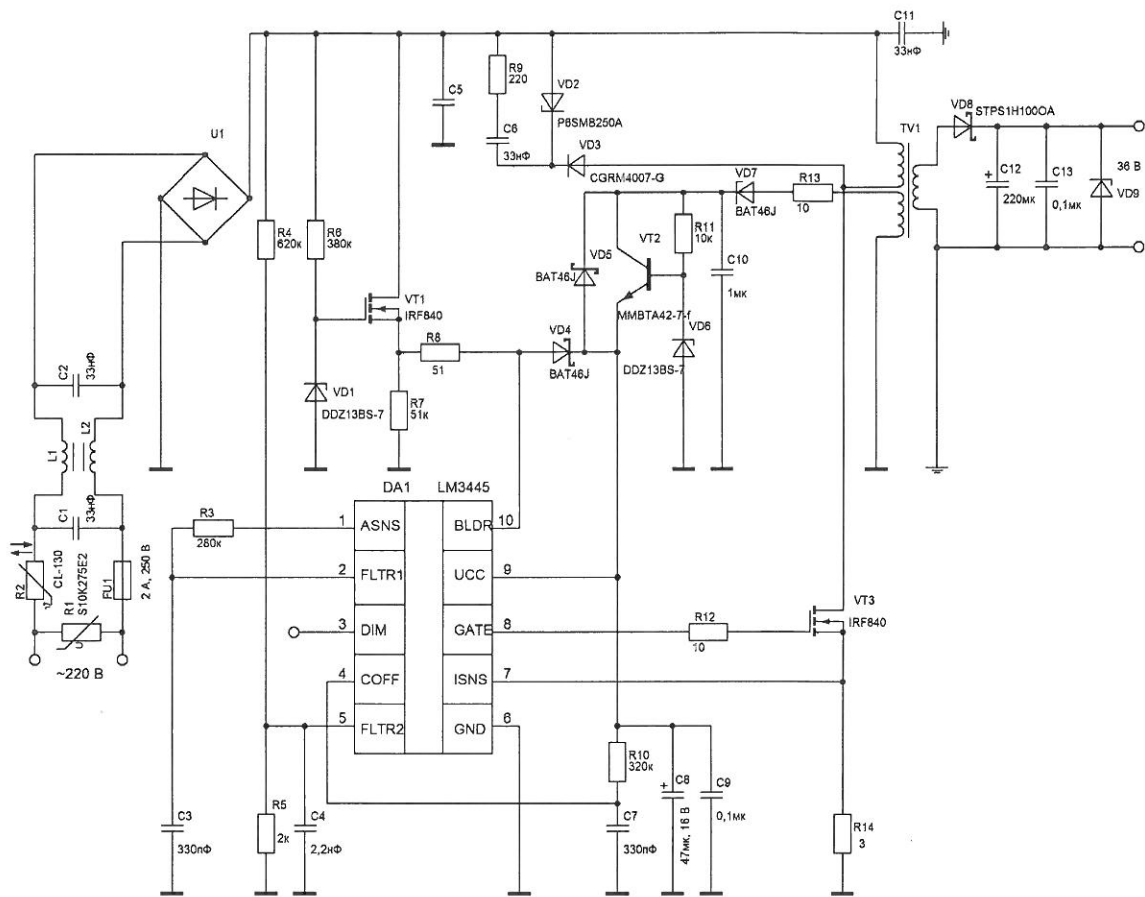


Рисунок 7 – Схема электрическая принципиальная УП светодиодной лампы с гальванической развязкой

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19

Лист

24

Для сборки данной схемы в условиях не приближенных к промышленным, были выбраны электронные компоненты штыревого монтажа, которые являются аналогами элементов поверхностного монтажа.

На основании принципиальной электрической схемы, приведённой на рисунке 8 была разработана и изготовлена экспериментальная печатная плата УП для светодиодной лампы. Для изготовления макета понадобился двухсторонний фольгированный текстолит. Путем термической обработки была перенесена маска на плату. На рисунках 8, 9 изображено перенесение маски на плату.

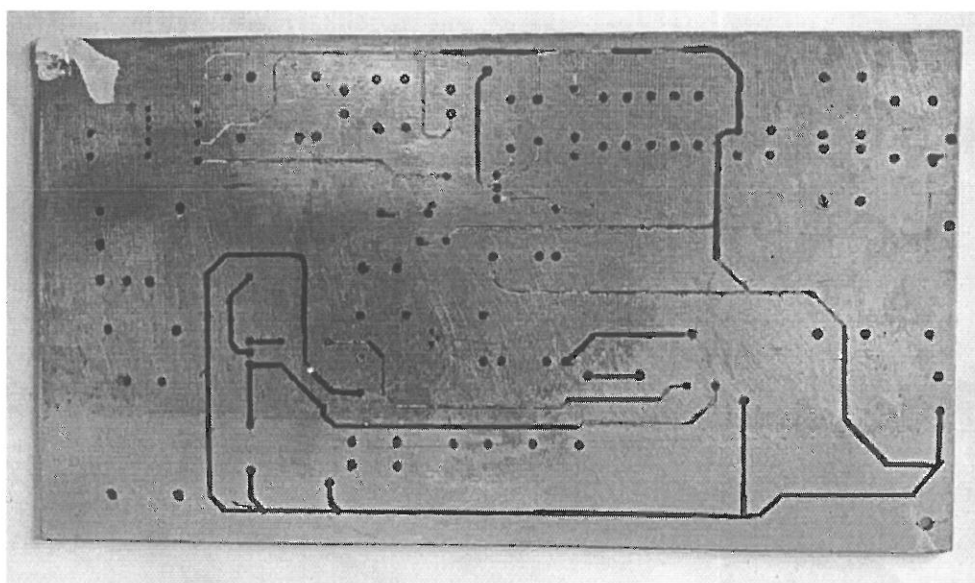


Рисунок 8 – Перенесенная маска на нижнем слое платы

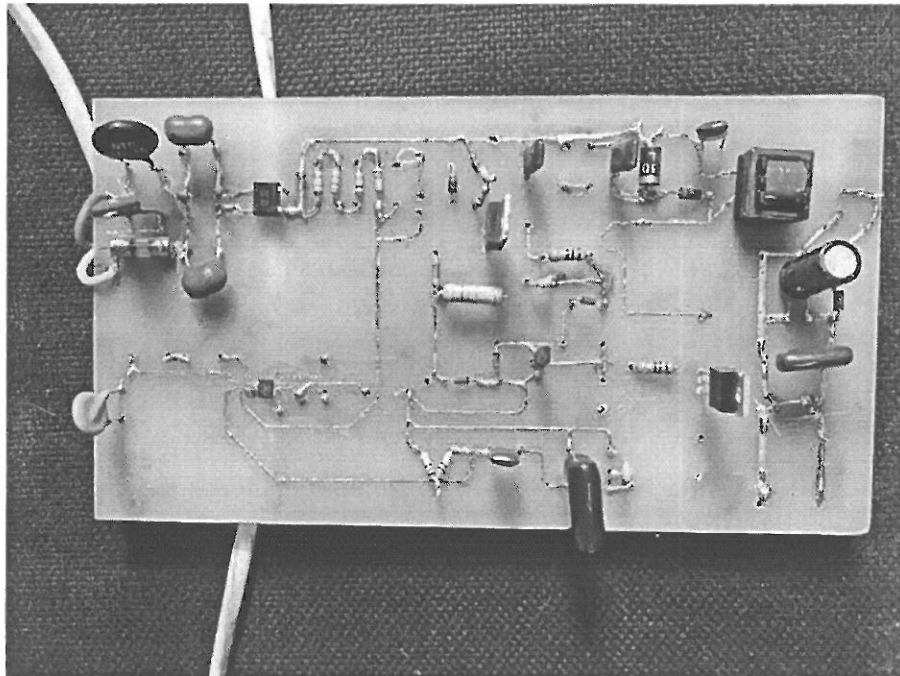


Рисунок 10 – Верхняя сторона платы после пайки

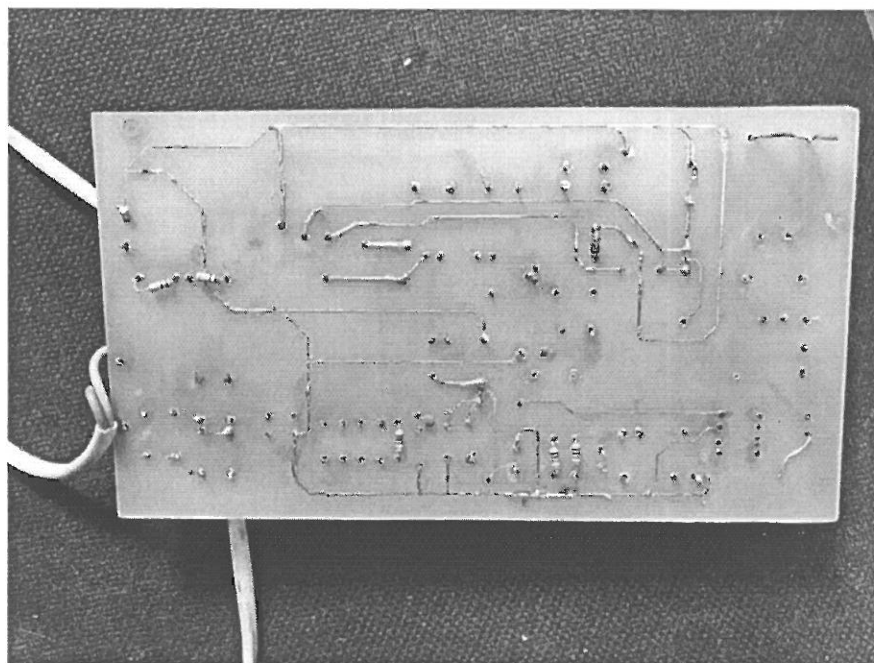


Рисунок 11 – Нижняя сторона платы после пайки

Был изготовлен светодиодный кластер из 7 светодиодов на алюминиевой основе для лучшего охлаждения. На рисунке 12 изображен светодиодный кластер.

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

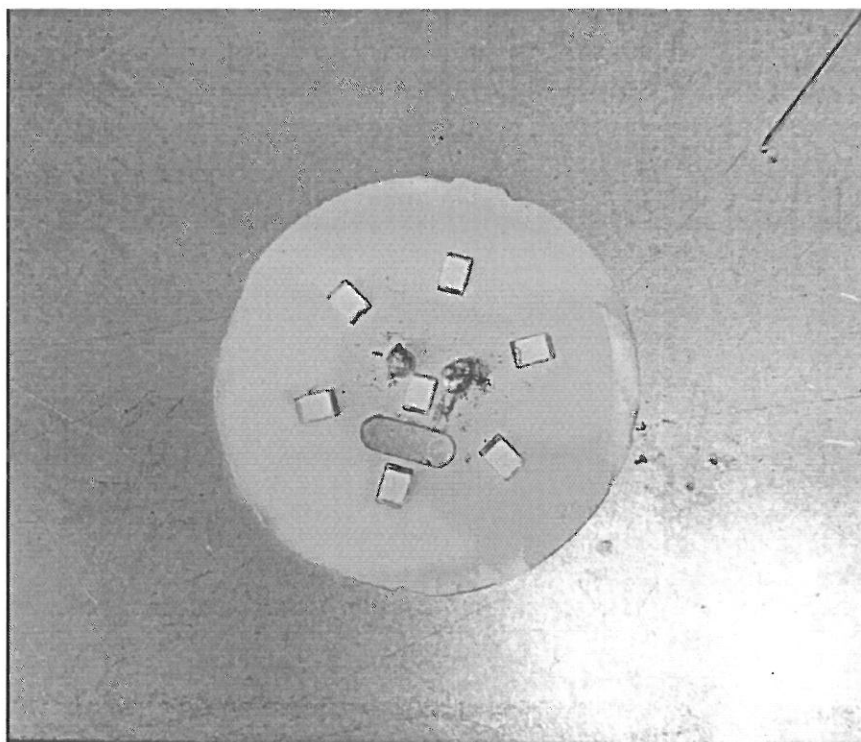


Рисунок 12 – Светодиодный кластер из 7 светодиодов.

Далее осуществлена сборка макета и проведены испытания устройства питания. Соблюдая технику безопасности, было проведено первое включение. После этого собран корпус для макета, закреплена плата, установлен светодиодный кластер в корпус лампы.

В дальнейшем был проведён эксперимент, в котором светодиодная лампа подключалась к питающей сети, напряжением 220 В. Работа светодиодной лампы с управлением от экспериментального УП приведена на рисунке 13.

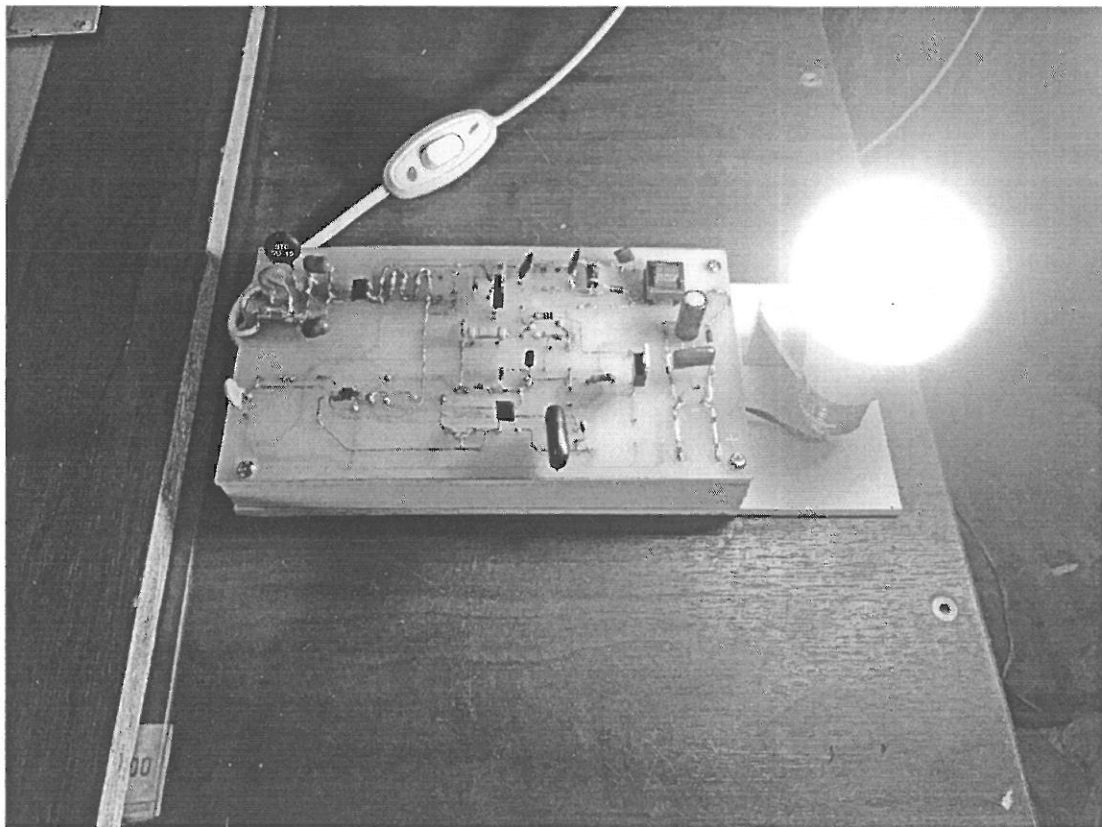


Рисунок 13 – Работа светодиодной лампы от экспериментального УП

Разработка топологии печатной платы УП для светодиодной лампы проводилась в Sprint Layout 6.0. Эскиз печатной платы приведён ниже в приложениях Б, В, Г. Изготовление печатной платы проводилась на основе двустороннего фольгированного текстолита типа FR-35. Топология печатной платы – двусторонняя. Форма и размеры печатной платы выбирались исходя из размеров и количества электронных компонентов. Размер печатной платы – 200 x 110 мм. Используются элементы для штыревого монтажа, а также для поверхностного монтажа (чип-элементы).

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения бакалаврской работы были изучены общие технические требования к светодиодным лампам с характеристиками, которые соответствуют широко применяемым лампам накаливания мощностью 40 и 60 Вт. Произведён выбор элементной базы для построения УП для светодиодных ламп. Проработаны варианты реализации УП. На основании полученных данных синтезированы принципиальные электрические схемы УП без гальванической изоляцией нагрузки и с гальванической изоляцией. Разработанные принципиальные электрические схемы УП обеспечивают возможность управления (диммирования) световым потоком светодиодной лампы непосредственно изменением величины питающего напряжения сети 220 В при помощи таких устройств как диммеры.

Произведён расчёт элементов схем УП для светодиодной лампы, а также расчёт электрических режимов работы УП. Разработан эскиз топологии печатной платы УП. На текстолите FR-35 изготовлен экспериментальный образец печатной платы УП для светодиодной лампы.

Таким образом, подготовлена предварительная техническая информация для проведения дальнейших экспериментальных работ с перспективой проведения опытно-конструкторских работ по серийному изготовлению УП для светодиодных ламп, ориентированных на применение в сфере энергосберегающего освещения.

					БР – 02069964 – 11.03.04 – 10 – 19	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Проб. принята

Стор. №

Подп. и дата

Инд. № эл.дг

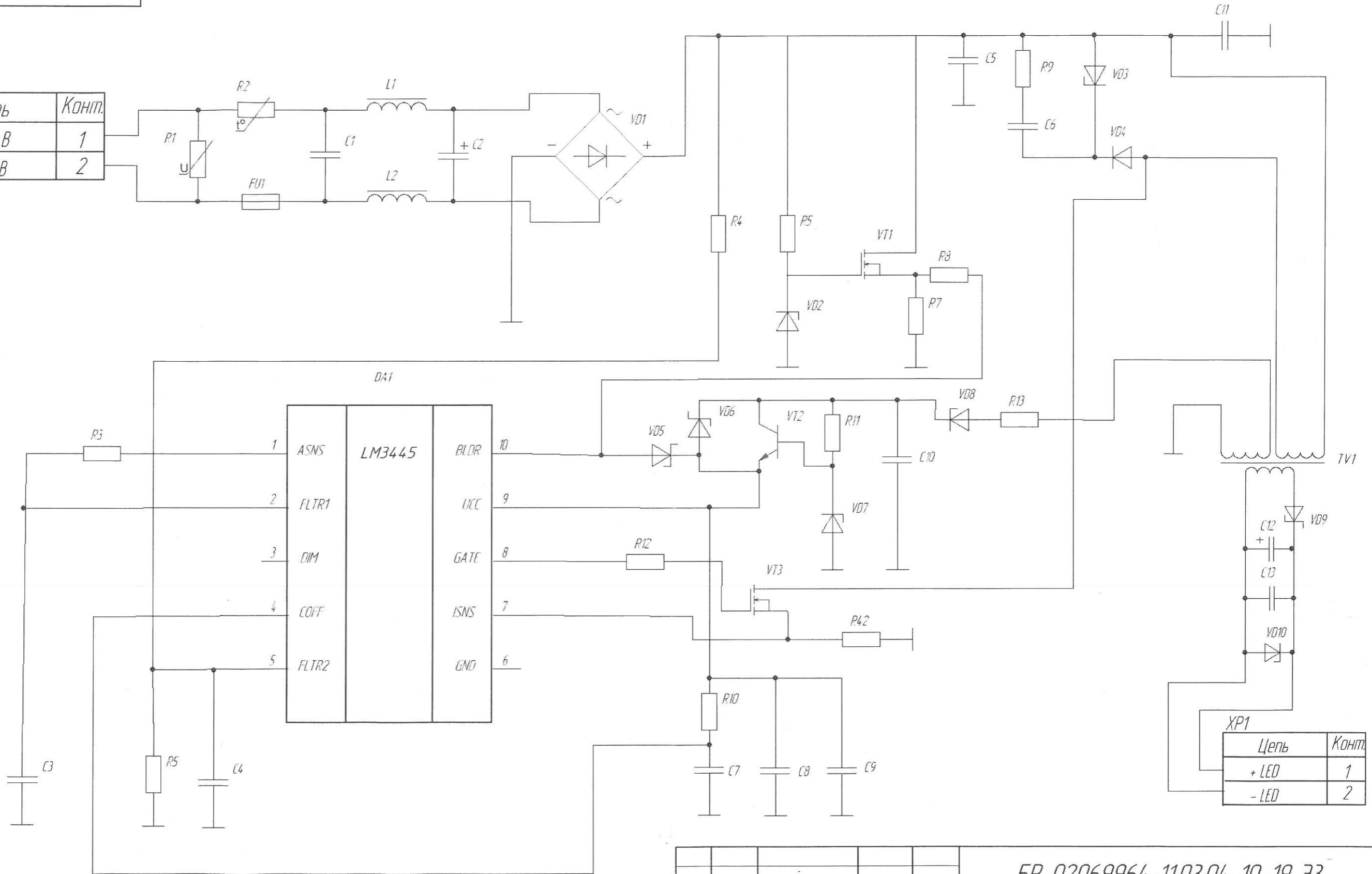
Взам. инд. №

Подп. и дата

Инд. № подл.

XP1

Цель	Конт.
~220 В	1
~220 В	2



XP1

Цель	Конт.
+ LED	1
- LED	2

БР-02069964-11.03.04-10-19 33

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Курнаев В. В.	<i>В.В.К.</i>	13.09
Проб.		Сураикин А. И.	<i>А.И.С.</i>	17.09
Т. контр.				
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.Ш.</i>	18.06.09
Чтв		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.Б.</i>	19.06.09

Схема электрическая
принципиальная
устройства питания

Лит.	Масса	Масштаб
Лист 1		Листов 3

Приложение А

МГУ им. Н. П. Огарева
ИЭС ЭНЭ 411 гр.

Зона	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Микросхемы				
DA1				
Конденсаторы				
C1,C2,C3		K10-17Б-0.033 мкФ-630 В 10%		
C4		K73-17 -0.022 мкФ-250 В 5%		
C5,C6		K10-17Б-0.033 мкФ-630 В 10%		
C7		K10-17Б-М47-330 пФ-50 В 5%		
C8		K50-35-0.47 мкФ-100 В,		
C9,C13		K10-17Б-Н90-0.1 мкФ-50 В 10%		
C10		K10-17Б-1 мкФ-35 В 10%		
C11		K10-17Б-0.033 мкФ-630 В 10%		
C12		K50-35-220 мкФ-50 В		
Предохранители				
FU1		H520PT, 0.5 А, 250 В		
Катушки индуктивности				
L1,L2		КИГ 0.1- 4700 мкГн, 10%		
Резисторы				
R1		VDR-10D431, 430 В		
R2		NTC-5D15, 5 Ом, 6А, 20%		
R3,R10		CF-100 (С1-4) 1 Вт, 300 кОм, 5%		
R4		CF-100 (С1-4) 1 Вт, 620 кОм, 5%		
R5		CF-100 (С1-4) 1 Вт, 2 кОм, 5%		
R6		CF-25 (С1-4) 0.25 Вт, 390 кОм, 5%		
R7		CF-25 (С1-4) 0.25 Вт, 51 кОм, 5%		
R8		CF-25 (С1-4) 0.25 Вт, 51 Ом, 5%		
R9		CF-25 (С1-4) 0.25 Вт, 220 Ом, 5%		
R11		CF-100 (С1-4) 1 Вт, 330 кОм, 5%		
R12,R13		CF-25 (С1-4) 0.25 Вт, 10 Ом, 5%		
R14		CF-25 (С1-4) 0.25 Вт, 3 Ом, 5%		
БР - 02069964 - 11.03.04 - 10 - 19 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Курнаев В. В.	<i>В. Курнаев</i>	17.08.2019
Пров.		Сурайкин А. И.	<i>А. Сурайкин</i>	17.08.2019
Н.контр.		Шестеркина А.	<i>А. Шестеркина</i>	18.08.19
Утв.		Беспалов Н. Н.	<i>Н. Беспалов</i>	19.08.19
Перечень использованных элементов УП				
Лит.	Лист	Листов		
	2	3		
МГУ им. Н. П. Огарёва ИЭС ЭНЗ 411 гр.				

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

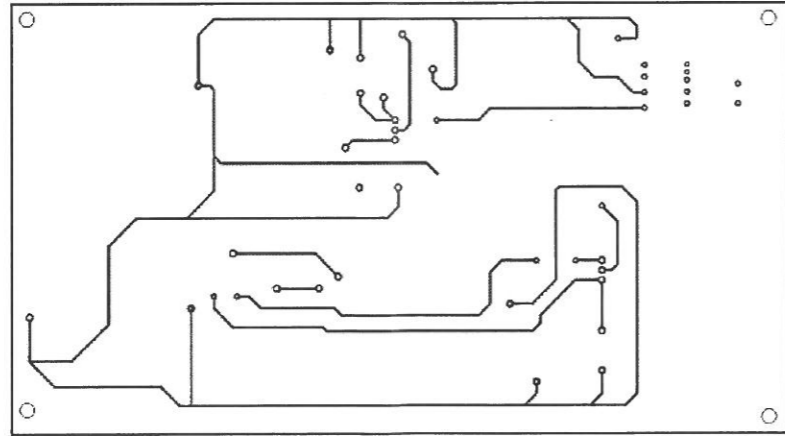
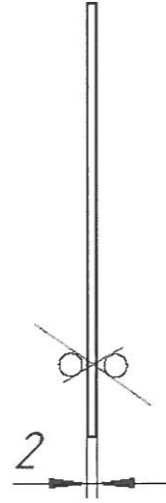
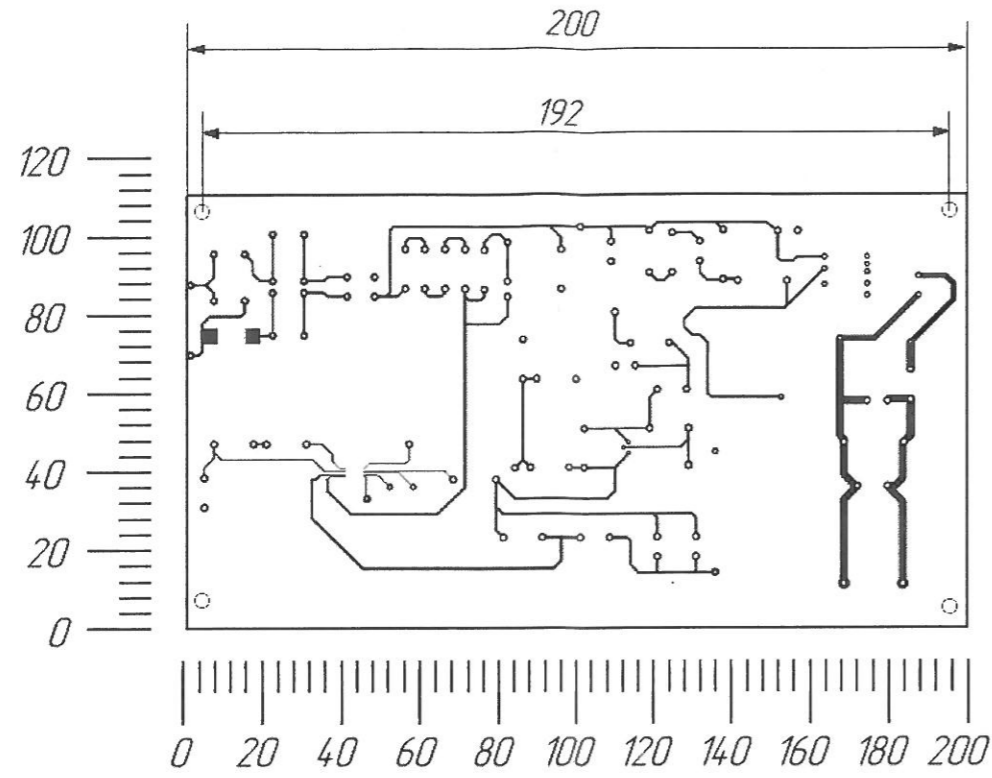


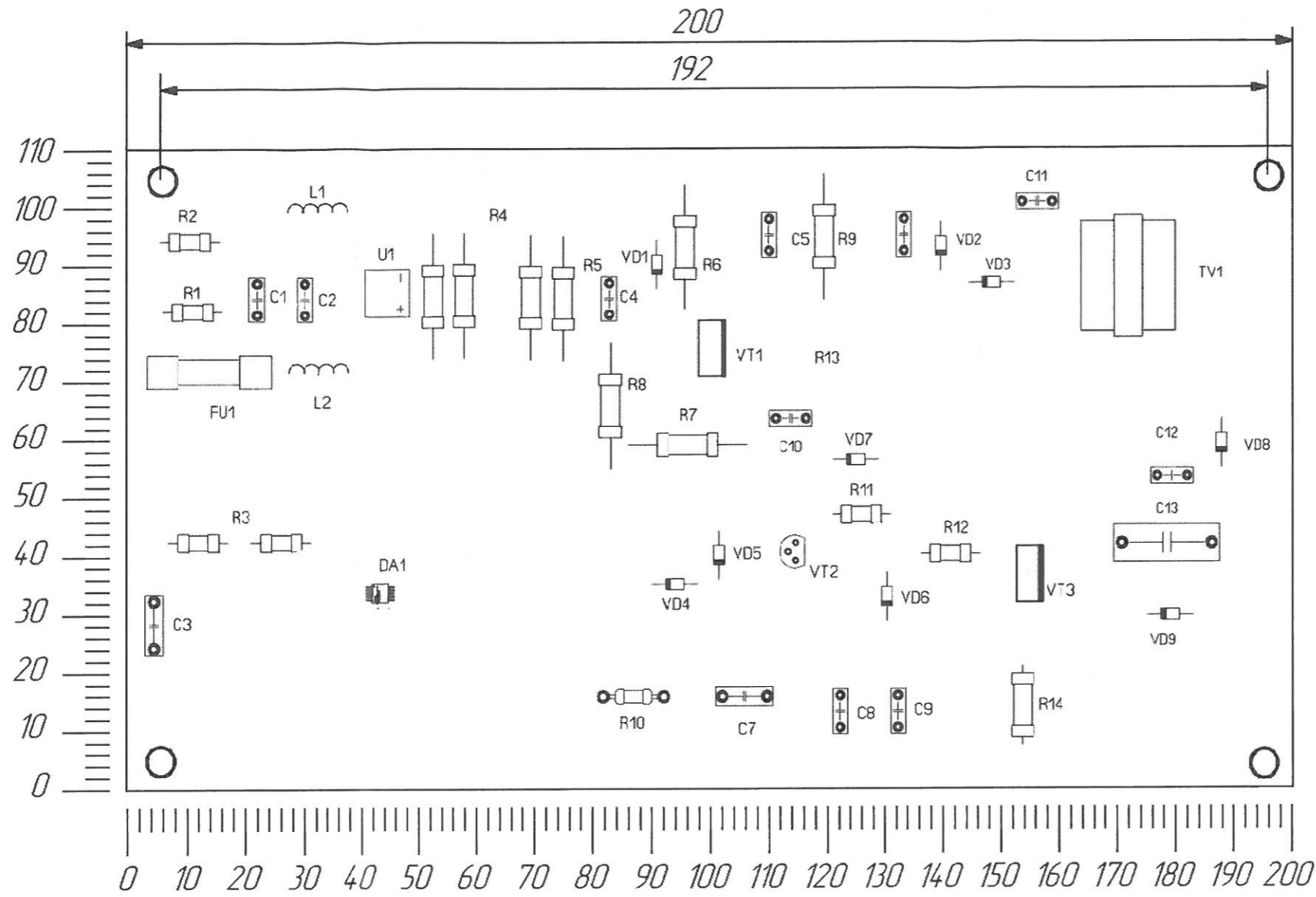
Таблица 1

Условное обозначение	Диаметр отверстия, мм	Размер элемента проводящего рисунка, мм	Количество отверстий	Примечание
•	1	2,2 x 2,2	121	метал.
○	3,5	4,0 x 4,0	4	метал.

1. Плату изготовить комбинированным методом.
2. Шаг координатной сетки 1,25 мм.
3. Конфигурацию проводников выдерживать по чертежной сетке.
4. Расстояние между проводниками не менее 0,3 мм.
5. Допускается в узких местах занижение контактных площадок до 0,15 мм.
6. Проводники покрыть сплавом "Розе".
7. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Изм. № докум.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Изм. № подл.

					БР-02069964-11.03.04-10-19 ПП			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Печатная плата Устройства питания	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Кирнаев В. В.	<i>[Signature]</i>	17.06.2019				2:1
Пров.		Сурайкин А. И.	<i>[Signature]</i>	17.06.2019				
Т. контр.						Лист 1		Листов 1
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	18.06.19	Приложение Б	МГУ им. Н. П. Огарева ИЭС ЭНЭ 411 гр.		
Утв.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	19.06.19				



1. Припой ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
2. Установку элементов производить по ОСТ4 ГО.010.030-81.
3. Печатные проводники и переходные отверстия условно не показаны.
4. Плату после сборки покрыть эмалью ЭП-572, белый, ТУ6-10-1539.
5. Заводской номер, обозначения элементов маркировать краской ЧМ, черный, БМ, белый, ТУ029-02-859-78. Шрифт 2,5 по НО. 010. 007.
6. Места расположения маркировки показаны условно

					БР-02069964-11.03.04-10-19 СБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Сборочный чертеж Устройства питания	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Курнаев В. В.	<i>В.В. Курнаев</i>	17.06.2019				1:1
Пров.		Сурайкин А. И.	<i>А.И. Сурайкин</i>	17.06.2019				
Т. контр.						Лист 1	Листов 1	
Н. контр.		Шестеркина А.А.	<i>А.А. Шестеркина</i>	18.06.19	Приложение В	МГУ им. Н. П. Огарева ИЭС ЭНЭ 411 гр.		
Утв.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н. Беспалов</i>	19.06.19				

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Заведующему кафедрой
электроники и наноэлектроники
Беспалову Н.Н.
Студента 4 курса очной формы
обучения (на бесплатной основе)
направления подготовки 11.03.04
«Электроника и наноэлектроника»
Института электроники и светотехники
Курнаева Вадима Вячеславовича

заявление

Прошу разместить мою выпускную квалификационную работу на тему
«Разработка устройства питания светодиодных ламп» в электронной
библиотечной системе университета в полном объеме.

25.06.2019

дата


подпись

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: Курнаев Вадим Вячеславович baron.gopro@gmail.com / ID: 1504389
 Проверяющий: Курнаев Вадим Вячеславович (baron.gopro@gmail.com) / ID: 1504389
 Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://users.antiplagiat.ru>

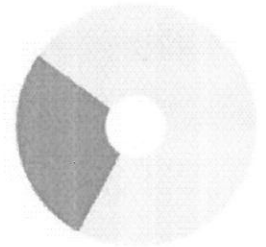
ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 7
 Начало загрузки: 18.06.2019 18:47:17
 Длительность загрузки: 00:00:01
 Имя исходного файла: Разработка устройства питания светодиодных ламп
 Размер текста: 1850 кБ
 Символов в тексте: 35683
 Слов в тексте: 4444
 Число предложений: 422

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
 Начало проверки: 18.06.2019 18:47:19
 Длительность проверки: 00:00:01
 Комментарии: не указано
 Модули поиска: Модуль поиска Интернет

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
27,47%	0%	72,53%



Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
 Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	12,67%	12,75%	Высокоэффективное устрой...	https://cyberleninka.ru	17 Сен 2018	Модуль поиска Интернет	51	52
[02]	12,41%	12,4%	1. Теоретическая часть	http://davaiknam.ru	24 Мая 2016	Модуль поиска Интернет	20	20
[03]	0,01%	9,19%	МАСТЕРУ-УМЕЛЬЦУ, ОРИГИ...	http://lib.knigi-x.ru	07 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет	2	39

Еще источников: 5
 Еще заимствований: 2,38%

Руководитель работы

14.06.2019

Сурайкин А. И.

Заявление о самостоятельном характере выполнения
бакалаврской работы

Я, Курнаев Вадим Вячеславович, студент 4 курса, направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», заявляю, что в моей бакалаврской работе на тему «Разработка устройства питания светодиодных ламп», представленной в Государственную экзаменационную комиссию для публичной защиты, не содержится элементов неправомерных заимствований.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также ранее защищенных письменных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим в Университете Положением о проверке выпускных квалификационных работ студентов ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н. П. Огарева» на наличие заимствований, в соответствии с которым обнаружение неправомерных заимствований является основанием для неудовлетворительной оценки выпускной квалификационной работы.

Подпись студента



Дата 14.06.2019

Работа представлена для проверки в Системе

Дата представления ВКР

17.06.2019



Подпись руководителя ВКР

ОТЗЫВ
на бакалаврскую работу Курнаева Вадима Вячеславовича
студента 4 курса очной формы обучения
института электроники и светотехники
направления подготовки «Электроника и наноэлектроника»
на тему: «Разработка устройства питания светодиодных ламп»

Бакалаврская работа Курнаева В. В. посвящена актуальной теме – разработке устройства питания сверхъярких светодиодов. Разрабатываемое устройство питания ориентировано на применение в составе светодиодных ламп для жилищно-коммунального хозяйства, промышленных предприятий, сферы быта. Достоинства применения светодиодных ламп очевидны – экономия электроэнергии, а также использование имеющихся электротехнических коммуникаций ламп накаливания с цоколем Е-27, что предполагает их простую замену.

В соответствие с темой бакалаврской работы, перед Курнаевым В. В. были поставлены задачи: разработать принципиальную электрическую схему устройства питания на основе современной элементной базы; выполнить расчёт режимов работы устройства питания; разработать печатную плату и изготовить макетный образец устройства питания.

С поставленными задачами Курнаев В. В. успешно справился. К достоинствам бакалаврской работы Курнаева В. В. можно отнести применение современной качественной элементной базы, тщательно выполненный расчёт режимов работы устройства питания. Применение САПР MultiSim при расчёте отдельных цепей принципиальной электрической схемы устройства питания. Изготовленный макетный образец наглядно демонстрирует работу устройства питания светодиодов.

В процессе выполнения бакалаврской работы Курнаев В. В. показал себя как хорошо подготовленный студент, обладающий необходимыми знаниями в области разработки электронных устройств. Следует отметить большую самостоятельность Курнаева В. В. при выполнении бакалаврской работы.

Бакалаврская работа Курнаева В. В. выполнена на высоком техническом уровне, автор вполне готов к самостоятельной работе. Считаю, что бакалаврская работа заслуживает оценки «отлично», а Курнаев В. В. присвоения квалификации бакалавра по направлению подготовки «Электроника и наноэлектроника».

Руководитель,
доцент кафедры электроники и
наноэлектроники, к.т.н.



А. И. Сурайкин