Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Факультет компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники

Кафедра «Автоматика и управление»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ / Л.С. Казаринов
_____ 2016 г.

Электронный пускорегулирующий аппарат с низкочастотным выходным током

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 220400.62.2016.886.ПЗ ВКР

Руководитель проекта
_____ / Константинова О.В.
«14» 06 2016 г.

Автор проекта
студент группы КТУР-414
_____ /Краснова Д.Е.
«14» июня 2016 г.

Нормоконтролер
_____ /Барбасова Т.А.
«14» 06 2016 г.

Челябинск 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Факультет компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники
Кафедра «Автоматика и управление»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ / Л.С. Казаринов
_____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ
На выпускную квалификационную работу студента

Краснова Дарья Евгеньевна

Группа КТУР-414

1. Тема работы

Электронный пускорегулирующий аппарат с низкочастотным выходным током

утверждена приказом по университету от 15 апреля 2016 г. № 661

(утверждена распоряжения по факультету от _____ 2016 г. № _____)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 15 июня 2016 г.

3. Исходные данные к работе:

1) Напряжение питания: от 170 В до 250 В
2) Номинальная выходная мощность: 250Вт
3) Управление мощностью: от 40% до 100%
4) Рабочая частота выходного напряжения 50 Гц
5) Защита от отсутствия лампы (попытка перезапуска через 5 минут)
6) Требования к микроконтроллеру:
7) Наличие интерфейса связи I^2C
8) Наличие 4 аналоговых входа для преобразования температуры, сетевое напряжения, выходного напряжения на лампе и напряжение на ККМ

9) Наличие 4 каналов ШИМ низкой частоты с возможностью управления двумя парами ключей

10) Наличие 1 канала ШИМ высокой частоты

11) Возможность конфигурации одного выхода как открытый коллектор

12) Наличие 15 линий ввода-вывода

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Разработка алгоритма работы ЭПРА

Выбор микроконтроллера для управления ЭПРА

Формирование слова состояния

Формирование слова записи

Формирование ШИМ для управления мощностью ЭПРА

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей, плакатов в листах формата А4)

Функциональная схема низкочастотного ЭПРА

Алгоритм работы ЭПРА

Всего 58 листов

6. Консультанты по работе, с указанием относящихся к ним разделов работы

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
Описание технического объекта	Константинова О.В.		
Расчетная часть	Константинова О.В.		
Исследования и результаты	Константинова О.В.		

7. Дата выдачи задания 15 апреля 2016 г.

Руководитель _____ (подпись) (И.О.Ф.)

Задание принял к исполнению _____ (подпись студента) (И.О.Ф.)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Описание технического объекта	15.04-30.04	
Расчетная часть	30.04-13.05	
Исследования и результаты	13.05-01.06	

Заведующий кафедрой _____ / /

Руководитель работы _____ / /

Студент КТУР-414 _____ / /

АННОТАЦИЯ

Краснова Д.Е. Электронный пускорегулирующий аппарат с низкочастотным выходным током – Челябинск: ЮУрГУ, КТУР, 58 с., 6 табл., библиогр. список – 15 наим.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена обеспечению работоспособности светильника на базе электронного пускорегулирующего аппарата с низкочастотным выходным током. Основными источниками городского освещения являются газоразрядные натриевые и металлогалогенные лампы. Так как лампа — это нелинейный элемент, поэтому управление представляет собой довольно сложную задачу. Существенное улучшение режимов использования таких ламп можно достичь применением ЭПРА (электронный пускорегулирующий аппарат), который формирует режимы работы лампы с помощью высокочастотного управления потоком энергии от питающей сети попадающей в лампу.

Неправильное использование ламп в сетях приводит к тому что, вместо 10 тысяч часов, по паспортным данным, лампа светит 800-1000 часов. Из-за этого их приходится очень часто заменять поскольку они выходят из строя, что приводит к растрате бюджетных средств города. Поэтому данная работа очень актуальна.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы использовались следующие программы: Visio, Word, PowerPoint 2016, Visual Studio 2015.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 8
1 ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЛАМПА КАК СЛОЖНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО **10**
1 Натриевые лампы высокого давления 11
2 Математическая модель газоразрядной лампы 14
2 РАЗНОВИДНОСТИ ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ **18**
2.1 Электромагнитные пускорегулирующие аппараты 18
2.2 Электронные пускорегулирующие аппараты 19
3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ ЭПРА **25**
3.1 Выбор микроконтроллера для управления ЭПРА 25
3.2 Выбор языка и среды программирования 25
3.3 Разработка алгоритма работы ЭПРА 27
4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭПРА **31**
4.1 Формирование слова состояния 31
4.2 Описание функций 40
4.3 Формирование ШИМ для управления мощностью ЭПРА 48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 55
ПРИЛОЖЕНИЕ А ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
ПРИЛОЖЕНИЕ В ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уделяется большое внимание повышению энергоэффективности осветительных систем. Поэтому активно продвигаются проекты по созданию и производству энергоэффективного осветительного оборудования. При этом повышение энергетической эффективности связано с такими аспектами как:

1. Изменение принципов преобразования электрической энергии в световую.
2. Разработка электронных устройств, обеспечивающих нормальный режим работы преобразователей.

Среди современных эффективных преобразователей следует отметить светодиодные преобразователи и преобразователи на основе натриевых газоразрядных ламп или металлогалогенных ламп. Светодиодные имеют несколько большее значение коэффициента преобразования по сравнению с преобразователями на основе натриевых газоразрядных ламп. Основной недостаток светодиодных преобразователей – высокая цена. В настоящее время светодиодные имеют ограниченное применение, а преобразователи на основе натриевых газоразрядных ламп и металлогалогенных ламп очень широко применяются для освещения дорог, промышленных зданий, дворов, производственных площадок и т.д. Так около 80% городского освещения осуществляется данными типами лампами.

Для того, чтобы газоразрядные лампы работали нормально, необходимо создать оптимальные условия их работы. Электронные пускорегулирующие устройства обеспечивают надежное зажигание лампы, стабильность работы и оптимальные мощность и световой поток, а также продлевают срок службы лампы, включают в себя корректор коэффициента мощности (ККМ), фильтр радиопомех, стабилизатор светового потока.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в обеспечении

работоспособности светильника на базе ЭПРА с низкочастотным выходным током.

Для написания выпускной квалификационной работы поставлены следующие задачи:

1. Создание математической модели процесса функционирования устройства с лампой.
2. Разработка алгоритма функционирования устройства управления в различных режимах работы.
3. Написание программы для микроконтроллера.
4. Программирование управляющего микроконтроллера и отладка программы.

1 ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЛАМПА КАК СЛОЖНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

Газоразрядной лампой называют лампу, в которой оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в газах, парах или их смесях. Цвет светового излучения зависит от рода газа, его давления и от вида люминофора, нанесенного на внутренние стенки стеклянного баллона лампы. Газоразрядные лампы наполняются инертными газами (неоном, аргоном, криптоном или ксеноном), а также парами ртути или натрия.

Области применения газоразрядных ламп определяются чем, что они имеют самую высокую световую отдачу и во много раз (от 10 до 50) больший срок службы, но сравнению с лампами накаливания, а также могут иметь разнообразные спектры изучения, широкий диапазон значений мощности, яркости и других параметров. Поэтому современные разрядные лампы все шире применяются для освещения, постепенно оттесняя лампы накаливания. Уже сегодня в передовых странах мира разрядные лампы создают 75 – 80% светового потока, и в будущем эта доля возрастет.

Подбирая соответствующие наполнение и условия разряда, удается создавать высокоэффективные источники излучения практически в любой части не только видимого, но также ультрафиолетовых и инфракрасных спектров. При этом можно получать спектры излучения, состоящие из одиночных линий, многолинейчатые и непрерывные. Это достоинство разрядных ламп открыло им исключительно широкие возможности применения не только для освещения, но также для многочисленных специальных целей.

Разряды высокого и особенно сверхвысокого давления имеют высокую яркость, в десятки и сотни раз превосходящую яркость лап накаливания. Поэтому разрядные лампы с успехом применяются в светооптических приборах и установках. Малая инерционность излучения разрядных ламп позволяет применять их там, где требуется модуляция излучения, например, при передаче изображений,

звукозаписи, оптической телефонии и в других случаях. Широкое и весьма разнообразное применение находят импульсные лампы (ИЛ), дающие вспышки излучения исключительно высокой яркости и очень малой длительности. Они применяются в многочисленных приборах и установках для наблюдения и изучения быстродвижущихся частей машин и механизмов (стробоскопы), фотографирования и изучения быстропротекающих процессов, аэрофотосъемки, оптической дальнометрии и т.д. В последнее время импульсные лампы широко применяются для оптической накачки лазеров.

Недостатком разрядных ламп является некоторая сложность их включения в сеть, связанная с особенностями разряда. Для его зажигания требуется более высокое напряжение, чем для устойчивого горения. Для обеспечения устойчивого горения в цепь каждой лампы необходимо включать балласт, ограничивающий ток разряда требуемыми пределами. Другой недостаток разрядных ламп с парами веществ, наполняющих разрядную колбу, обусловлен зависимостью их характеристик от теплового режима, поскольку температура определяет давление паров рабочего вещества лампы. Номинальный режим устанавливается в них только спустя некоторое время после включения. Повторное зажигание ламп с разрядом в парах металла при высоком и сверхвысоком давлении без специальных приемов возможно только по истечении некоторого времени после выключения [1].

1.1 Натриевые лампы высокого давления

Натриевая лампа высокого давления (НЛВД) типа ДНаТ, изображенная на рисунке 1.1, представляет собой горелку из светопропускающей поликристаллической керамики (окись алюминия), полость которой заполнена ксеноном с добавками натрия, придающего излучаемому свету желто-оранжевый оттенок, и ртути в виде амальгамы (амальгама – металлическая система, в состав которой в качестве одного из компонентов входит ртуть). Горелка размещена в

колбе, которая имеет цилиндрическую или эллиптическую форму и оснащена резьбовым цоколем. При работе лампы дуговой разряд в горелке осуществляется в парах ртути и натрия, что способствует его стабилизации.

Для откачки воздуха и наполнения ламп инертными газами в процессе изготовления используется штенгель. Во время работы лампы он выполняет роль вакуумно-плотного токоввода и держателя электрода, а его наружная часть служит холодной зоной, которая является резервуаром амальгамы натрия. Штенгель представляет собой бесшовную трубочку из ниобия, конец которой, входящий внутрь лампы, имеет специальную форму для крепления электрода.

Натриевые лампы высокого давления малочувствительны к температуре окружающей среды и работоспособны при ее изменении в диапазоне от - 60 до + 40 °С. Колебания напряжения электрической сети существенно сказываются на световых и электрических параметрах натриевых ламп. Кроме того, эти лампы требуют соблюдения установленного положения горения: цоколем вверх или вниз с нормированным отклонением от вертикального положения.

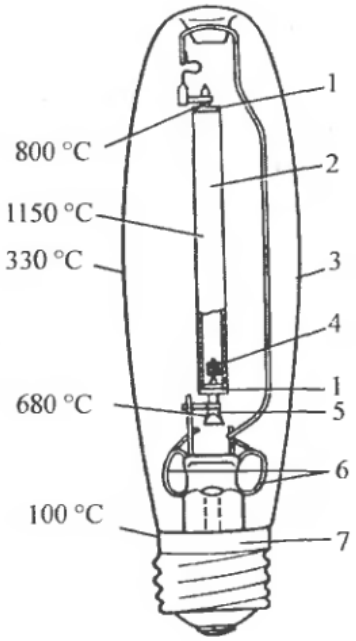


Рисунок 1.1 – Общий вид натриевой лампы высокого давления

1 – керамическая заглушка; 2 – керамическая светопропускающая трубка; 3 – внешняя колба из тугоплавкого стекла; 4 – электрод; 5 – ниобиевый штенгель; 6 – бариевый геттер (газопоглотитель); 7 – цоколь

Световая отдача ламп достигает 150 лм/Вт при сроке службы до 20000 ч. Цветовые характеристики натриевых ламп высокого давления относительно невысокие: лампа излучает свет желто-оранжевого цвета (T_c = 2000 К) и обладает плохой цветопередачей (R_a = 20 – 30). Улучшение качества цветопередачи при использовании натриевых ламп может быть достигнуто за счет их совместного применения с ртутными люминесцентными лампами высокого давления.

Лампы включаются в сеть так же, как лампы ДРИ – через последовательно включенный дроссель, рассчитанный на рабочий ток и напряжение лампы. Масса дросселя примерно на 30 % больше, чем у дросселя для лампы ДРЛ той же мощности из-за большего рабочего тока. Зажигание стандартных ламп выполняется с помощью импульсного зажигающего устройства (ИЗУ), создающего импульсы высокого напряжения (2 – 3 кВ), которое подключается непосредственно параллельно лампе или через часть обмотки дросселя. Коэффициент мощности комплекта «лампа – ПРА» в среднем 0,5. Пульсации светового потока достигают 70 %. Технические данные ламп ДНаТ приведены в таблице 1.1 [2].

Таблица 1.1– Технические характеристики ламп типа ДНаТ

Тип лампы	Номинальные значения			Средняя продолжительность горения (ч)
	мощность (Вт)	световой поток (лм)	световая отдача (лм/Вт)	
ДНаТ70	70	5800	80	6000
ДНаТ100	100	9500	95	6000
ДНаТ150	150	14500	100	6000
ДНаТ250	250	25000	100	10000
ДНаТ400-1	400	47000	125	15000
ДНаТ210	210	18000	86	10000
ДНаТ360	360	35000	97	15000

1.2 Математическая модель газоразрядной лампы

Математическая модель газоразрядной лампы базируется на уравнении закона сохранения энергии, использование которого корректно для описания процессов в газоразрядных лампах [3]. Моделируемый объект представляется в виде двухполюсника, включенного в электрическую цепь переменного тока. Взаимосвязь между параметрами лампы описывается дифференциальным уравнением, которое составлено на основе условия баланса энергии, поступающей от источника питания, и внутренней энергии объекта. Внутренняя энергия пропорциональна изменению температуры T, согласно следующему уравнению:

$$k_u \frac{dT}{dt} = P_{подв} - P_{пот}, \qquad (1.1)$$

где k_u – коэффициент, учитывающий инерционные свойства разряда (Вт·с/К);

$P_{подв}$ – подводимая мощность (Вт);

$P_{пот}$ – мощность потерь (большая ее часть составляет мощность излучения разряда) (Вт).

Для использования равенства (1.1) полагаем, что:

$$P_{подв} = u_л i_л, \qquad (1.2)$$

где $u_л$ – падение напряжения на лампе, В, $i_л$ – ток лампы, А.

Также будем полагать, что мощность потерь $P_{пот}$ пропорциональна квадрату изменения температуры T.[4] С учетом этого равенство (1.1) примет вид:

$$k_u \frac{dT}{dt} = u_л i_л - k_{охл} T^2, \qquad (1.3)$$

где $k_{охл}$ – коэффициент аппроксимации зависимости мощности потерь от температуры.

Для нахождения температуры в текущий момент времени уравнение (1.3) представляем в интегральной форме:

$$T = \frac{1}{k_u}\int (u_л i_л - k_{охл} T^2)dt + T(0), \qquad (1.4)$$

где $T(0)$ – начальная температура объекта, °С.

Представляя падение напряжения на лампе $u_л$ через $g_л(T)$, согласно закону Ома:

$$u_л = \frac{i_л}{g_л(T)}, \qquad (1.5)$$

где $g_л(T)$ – проводимость лампы, См.

Используя зависимость проводимости от температуры T, получим следующее уравнение:

$$g_л(T) = k_g T^{k_T}, \qquad (1.6)$$

где k_g, k_T – коэффициенты аппроксимации зависимости от температуры.

Для физического протекания процесса в лампе используем схему ее включения последовательно с индуктивным балластом, которая приведена на рисунке 1.2 [5].

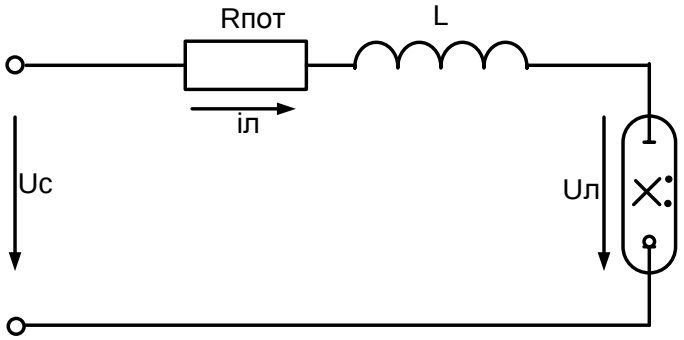


Рисунок 1.2 – Схема включения лампы с индуктивным балластом

На рисунке 1.2 приняты следующие обозначения: $R_{пот}$ – активное сопротивление обмоток дросселя; L – дроссель; ГРЛ – газоразрядная лампа. Использование данной схемы позволяет установить взаимосвязь электрических параметров лампы и схемы включения. Согласно второму закону Кирхгофа:

$$i_л = \frac{1}{L}\int (u_c - i_л R_{пот} - u_л) + i_л(0), \qquad (1.7)$$

где $i_л(0)$ – начальное значение тока лампы, А.

Математическая модель отображает взаимосвязь между параметрами в уравнениях (1.1) – (1.7) и представлена на рисунке 1.2.

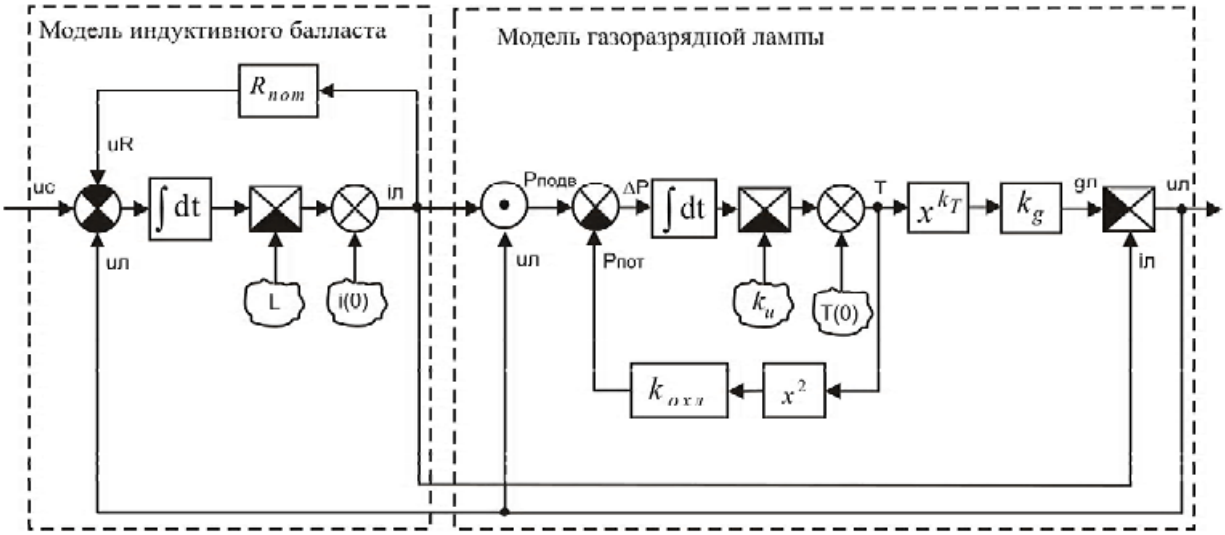


Рисунок 1.3 – Блок-схема математическая модели лампы

Блок–схема содержит модель индуктивного балласта и модель газоразрядной лампы. Ток индуктивного балласта рассчитывается в соответствии с уравнением (1.7) и является входным параметром лампы. Значение индуктивности L рассчитывается по ВАХ дросселя. Параметр $i_л(0)$ устанавливает начальное значение тока лампы. Сопротивление $R_{пот}$ приближенно учитывает активные потери в дросселе. Выходным параметром модели лампы является проводимость $g_л$, исходя из которой рассчитывается напряжение на лампе $u_л$. Параметр $T(0)$ устанавливает начальное значение температуры лампы. Коэффициенты $k_g, k_T, k_u, k_{охл}$ рассчитывается для каждой модели лампы. Отличительной особенностью блок-схемы является наглядность протекания физических процессов в математической модели лампы.[6]

Выводы по разделу 1:

Газоразрядная натриевая лампа в настоящее время является одним из наиболее применяемых источников освещения благодаря следующим положительным качествам:

1. Обладаем мощным световым потоком;
2. Цвет излучаемый лампой максимально близок к дневному;
3. Свет от лампы покрывает большую площадь;
4. Невысокая стоимость лампы;
5. Относительно дешевая стоимость утилизации;
6. Большой срок продолжительности горения.

Использование натриевых газоразрядных ламп связно с большим количеством сложностей. Лампа обладает нелинейный электрическим эмпидансом, который является функцией тока, напряжения, времени и температуры:

1. В нулевой момент времени лампа обладает очень высоким сопротивлением, и для его преодоления нужно высокое напряжение;
2. В режиме разогрева требуется время, для того чтобы разрядная трубка разогрелась до 500 °с. Сопротивление при этом возрастает до 40 – 120 ом;
3. В режиме работы нужно отслеживать форму и величину тока, подаваемую на лампу. Сопротивление при этом практически не изменяется, но ближе к окончанию срока службы оно возрастает.

2 РАЗНОВИДНОСТИ ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

Как известно, газоразрядные лампы имеют падающую вольт-амперную характеристику и нуждаются в стабилизирующих устройствах для поддержания разряда. Натриевые газоразрядные лампы требуют применение специального зажигающего устройства для первоначального пробоя газового межэлектродного промежутка. Эти функции выполняют пускорегулирующие аппараты (ПРА).

В общем виде требования, предъявляемые к ПРА, сводятся к следующим. Пускорегулирующий аппарат должен обеспечить надежное зажигание лампы, стабильность работы и оптимальные мощность и световой поток, а также максимальный срок службы лампы, компенсацию коэффициента мощности, подавление радиопомех до нормируемого уровня, уменьшение пульсаций светового потока, надежность в работе. При этом ПРА должны иметь малые массу и объем, большой срок службы, малые потери мощности и начальную стоимость, бесшумность в работе. Некоторые из этих требований противоречивы, и их одновременное выполнение для данного типа аппарата представляется невозможным [1].

2.1 Электромагнитные пускорегулирующие аппараты

Электромагнитные пускорегулирующие аппараты (ЭмПРА) состоит как минимум из индуктивного балласта и импульсного зажигающего устройства (ИЗУ). Если в комплект входит компенсирующий конденсатор, то эффективность ЭмПРА повышается.

Главным преимуществом индуктивного балласта являются малые потери мощности, которые для некоторых типов балластов составляют 5 – 10% мощности лампы. Другие важные преимущества – высокие стабилизирующие свойства и практическое отсутствие паузы тока. Поэтому в основном все ПРА для ГЛВД представляют собой индуктивные балласты, как правило, это индуктивные балластные дроссели.

Применение дросселей в качестве балластного элемента имеет большое количество отрицательных свойств:

1. Мощность натриевой газоразрядной лампы меняется в процессе ее работы.

2. Мощность натриевой газоразрядной лампы зависит от напряжения питания $U_{пит}$ лампы.

3. Это в совокупности приводит к тому, что лампа либо недосвечена, либо перегружена, что резко сокращает ресурс ее работы и требуется постоянная замена ламп.

Поэтому необходимо создавать электронные пускорегулирующие устройства (ЭПРА), которые предназначены для обеспечения требуемого режима работы газоразрядных осветительных ламп.

2.2 Электронные пускорегулирующие аппараты

Электронный пускорегулирующий аппарат (ЭПРА) – электронное устройство, осуществляющее пуск и поддержание рабочего режима газоразрядных осветительных ламп.

На сегодняшний день для ламп типа ДНаТ, ДРИ в основном выпускаются две категории ЭПРА, различающиеся по частоте тока лампы. Во-первых, это высокочастотные ЭПРА, где частота тока лампы достигает величины порядка 130 кГц, а регулирование мощности лампы осуществляется за счет изменения частоты тока лампы. Во-вторых, низкочастотные ЭПРА, где частота тока лампы неизменна и имеет значение 100 Гц (возможны некоторые отклонения от этой величины, но порядок таков), регулирование мощности лампы осуществляется за счет изменения амплитуды тока лампы. Форма тока лампы – прямоугольная.

Достоинство высокочастотного ЭПРА в невысокой цене, высокому КПД и высокой надежности, недостаток один – из-за явления акустического резонанса не каждую лампу можно применить с данной категорией ЭПРА. А это означает,

что для радикального решения задачи подавления этого негативного явления производителям ламп необходимо разрабатывать соответствующие конструкции ламп, что и начали делать ведущие мировые производители ламп и сопутствующей электроники [1]

«Высокочастотный» ЭПРА представляет собой структуру, состоящую из:

1. Корректора коэффициента мощности (PFC);
2. Полумостового инвертора (half bridge);
3. Системы поджига лампы.

Структурная схема высокочастного ЭПРА представлена на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 – Структурная схема высокочастотного ЭПРА

Достоинство низкочастотных ЭПРА в их универсальности. Рабочая частота тока лампы приближена к частоте 50Гц, т.е. частоте тока лампы на выходе электромагнитного ПРА, а именно для этих ПРА разрабатывались все традиционные лампы типа ДНаТ, ДРИ. Соответственно, при работе лампы с данным типом ЭПРА вероятность акустического резонанса крайне низка. Недостаток – в значительно более высокой цене как по отношению к электромагнитному ПРА, так и к высокочастотному ЭПРА. Кроме того, они имеют более сложную конструкцию [1].

«Низкочастотный» ЭПРА представляет структуру, состоящую из:

1. Корректора коэффициента мощности (PFC);
2. DC-DC понижающего (buck) преобразователя;
3. Мостового инвертора (full bridge);
4. Системы поджига лампы (ignitor).

Структурная схема низкочастотного ЭПРА представлена на рисунке 2.2.

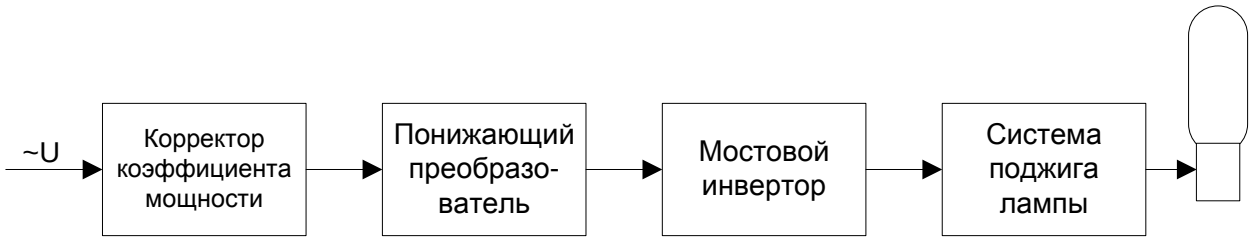


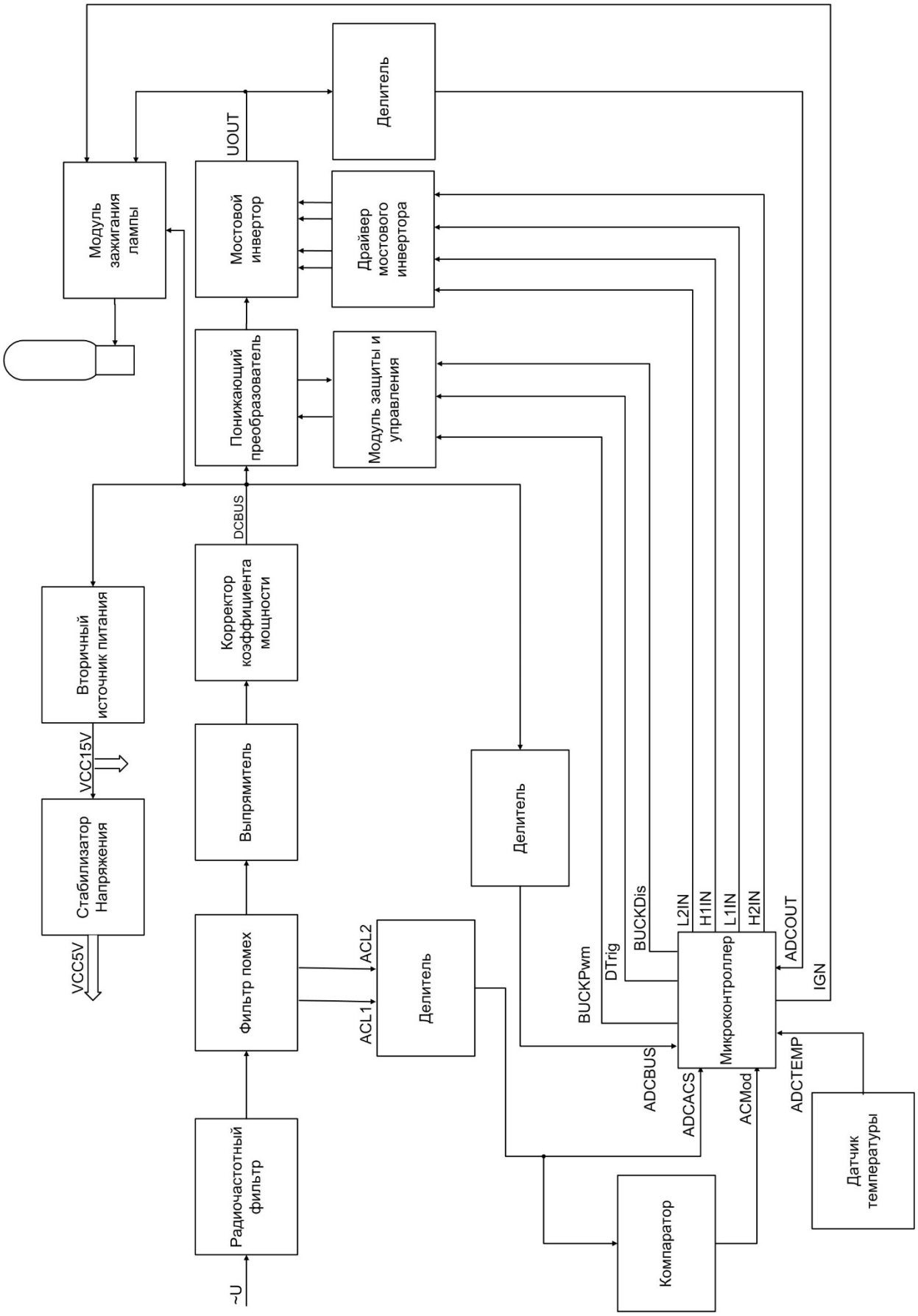
Рисунок 2.2 – Структурная схема низкочастотного ЭПРА

Корректор коэффициента мощности (PFC – Power Factor Correction) – это устройство, которое обеспечивает потребление устройством от питающей сети энергии так, как если бы оно несло чисто активную нагрузку, то есть потребление тока по форме совпадающего с напряжением. Выходным сигналов ККМ является постоянное высокое напряжение. После этого необходимо уменьшить напряжение до рабочего с помощью понижающего преобразователя.

Мостовой инвертор предназначен для преобразования рабочего постоянного напряжения в рабочее переменное напряжение без изменения номинала. Он представляет систему из четырех ключей и нагрузки, включенной в диагональ моста. При этом, если попарно ключи диагонали замыкаются, то нагрузка подключается к питающему напряжению *Unum*. Полумостовой инвертор отличается тем, что два ключа заменяются емкостями *C* с выводом эквивалентной средней точки, а два ключа являются управляющими. При этом нагрузка подключается либо к одной половине напряжения *Unum*, либо к другой половине напряжения *Unum* противоположного знака. На нагрузке будет напряжение равное *Unum/2*.

Система поджига лампы предназначена для формирования высоковольтного напряжения поджига лампы при включении лампы.

Функциональная схема низкочастотного ЭПРА представлена на рисунке 2.3.



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	220400.62.2016.886.00 ПЗ ВКР	Лист 22

Рисунок 2.3 – Функциональная схема низкочастотного ЭПРА

Выводы по разделу 2:

Проанализировав виды ПРА, используемые на сегодняшний день, можно выявить некоторые их преимущества по сравнению друг с другом:

Электронный пускорегулирующий аппарат обладает следующими преимуществами по сравнению с электромагнитным:

1. Отсутствие мерцания лампы;
2. Стабильность мощности и светового потока лампы при колебаниях сетевого напряжения;
3. Высокий коэффициент мощности;
4. Малая масса устройства;
5. Цельность монтируемого устройства;
6. Возможность управления уровнем излучения.

Низкочастотный ЭПРА обладает следующими преимуществами по сравнению с высокочастотным:

1. Возможность работы с лампами типа ДНаТ, ДРИ;
2. Меньшая вероятность акустического резонанса.

Таким образом, наиболее рентабельно работать с низкочастотным электронным пускорегулирующим аппаратом.

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ ЭПРА

3.1 Выбор микроконтроллера для управления ЭПРА

Для управления электронным пускорегулирующим аппаратом необходим микроконтроллер, обладающий следующими характеристиками:

1. Наличие интерфейса связи I^2C;
2. Наличие 4 аналоговых входов для преобразования температуры, сетевого напряжения, выходного напряжения на лампе и на ККМ;
3. Наличие 4 каналов ШИМ низкой частоты с возможностью управления двумя парами ключей;
4. Наличие 1 канала ШИМ высокой частоты;
5. Возможность конфигурации одного выхода как открытый коллектор;
6. Наличие 15 линий ввода-вывода.

На основании перечисленных характеристик выберем микроконтроллер – Выбранный микроконтроллер отличается невысокой ценой и доступностью на рынке.

3.2 Выбор языка и среды программирования

Для программирования микроконтроллеров существуют различные языки программирования, но, пожалуй, наиболее подходящими являются ассемблер и Си, поскольку в этих языках в наилучшей степени реализованы все необходимые возможности по управлению аппаратными средствами микроконтроллеров.

Ассемблер – это низкоуровневый язык программирования, использующий непосредственный набор инструкций микроконтроллера. Создание программы на этом языке требует хорошего знания системы команд программируемого чипа и достаточного времени на разработку программы. Ассемблер проигрывает Си в скорости и удобстве разработки программ, но имеет заметные преимущества в размере конечного исполняемого кода, а соответственно, и скорости его выполнения.

Си позволяет создавать программы с гораздо большим комфортом,

предоставляя разработчику все преимущества языка высокого уровня.

Основные преимущества Си перед ассемблером: высокая скорость разработки программ; универсальность, не требующая досконального изучения архитектуры микроконтроллера; лучшая документируемость и читаемость алгоритма; наличие библиотек функций; поддержка вычислений с плавающей точкой.

В языке Си гармонично сочетаются возможности программирования низкого уровня со свойствами языка высокого уровня. Возможность низкоуровневого программирования позволяет легко оперировать непосредственно аппаратными средствами, а свойства языка высокого уровня позволяют создавать легко читаемый и модифицируемый программный код. Кроме того, практически все компиляторы Си имеют возможность использовать ассемблерные вставки для написания критичных по времени выполнения и занимаемым ресурсам участков программы.[7]

Одним словом, Си – наиболее удобный язык для программирования, который сочетает в себе доступность, известность, удобство, безопасность и высокую скорость разработки. Для написания программы на языке Си выберем среду программирования IAR Embedded Workbench. IAR Embedded Workbench – одна из самых популярных сред разработки для микроконтроллеров на языке Си. В состав среды разработки входит компилятор, компоновщик и отладчик. Среда разработки имеет очень качественный оптимизатор. Дополнительные утилиты и хорошая встроенная система помощи дополнительно облегчают написание программ. Она обеспечивает расширенную поддержку микроконтроллеров и создает очень компактный и эффективный код.

Далее следует выбрать операционную систему, под которой будет происходить разработка данного программного обеспечения. В данный момент времени наибольшее распространение получила операционная система фирмы Microsoft Windows 7 (на январь 2016 года). Основные её преимущества: скорость, удобный пользовательский интерфейс.

3.3 Разработка алгоритма работы ЭПРА

Управление электронным пускорегулирующим аппаратом осуществляется микроконтроллером STM8S105K4T6. Алгоритм работы ЭПРА представлен на рисунках 3.1 - 3.3.

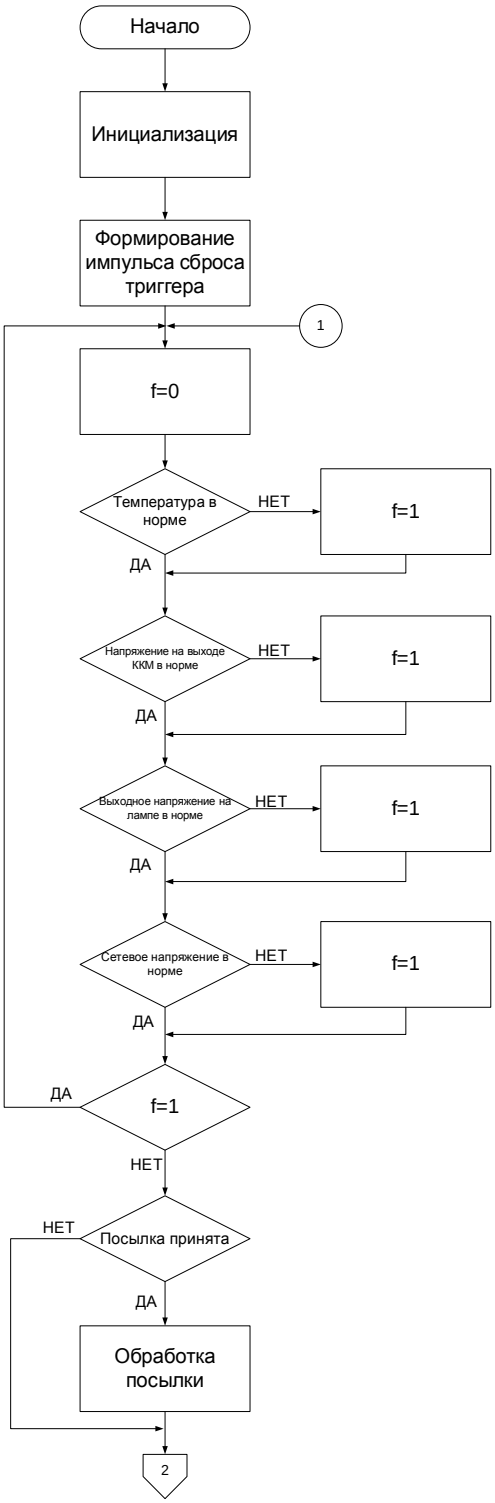


Рисунок 3.1 – Алгоритм работы (начало)

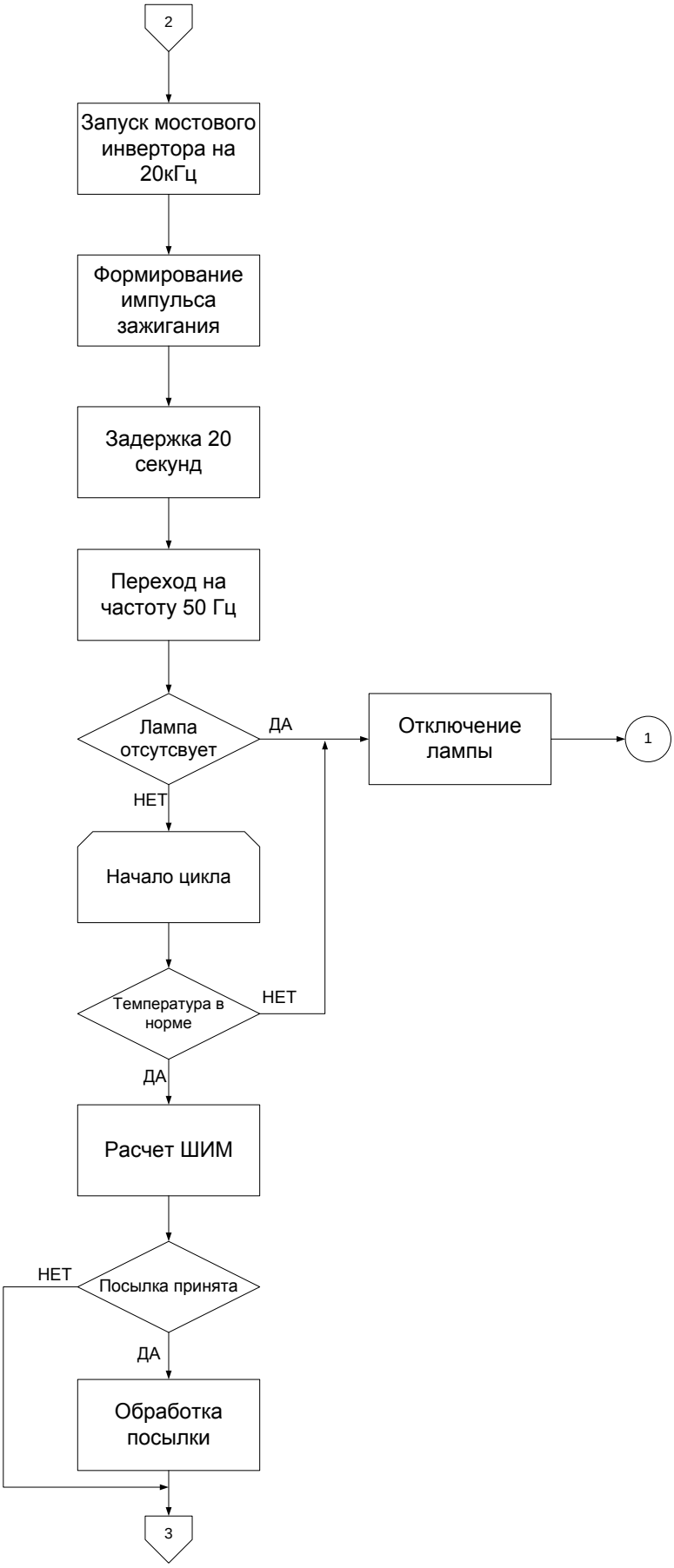


Рисунок 3.2 – Алгоритм работы (продолжение)

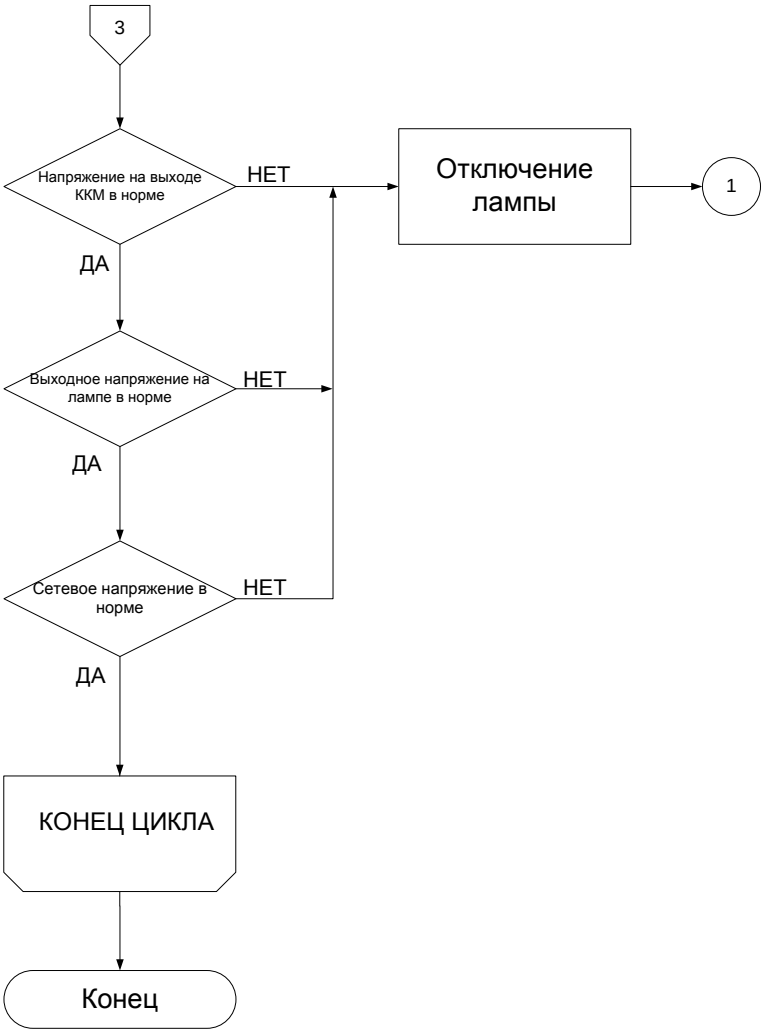


Рисунок 3.3 – Алгоритм работы (конец)

Процесс начинается с инициализации портов, АЦП и таймеров. После чего формируется импульс сброса триггера для доопределения начального состояния выхода триггера. Затем идет блок анализа состояний, где проверяем температуру, напряжение на выходе ККМ, выходное напряжение на лампе и сетевое напряжение. Если условие не в норме, то устанавливается f=1 и переходим на проверку следующего условия, а если выполняется заданное условие, то просто переходим на проверку следующего условия.

После окончания проверки всех условий, проверяется условие f=1. И если оно имеется, то идем в начало на сброс f=0 и обратно начинаем проверять выполнение всех условий. Если же все нормально и f=1 не устанавливалось, то

проверяет наличие принятой посылки. Если посылка принята, то запускается обработчик посылки, а если нет, то переходим сразу к запуску мостового инвертора на 20кГц. Мостовой инвертор запускаем на высокой частоте для того, чтобы лампа набрала рабочее напряжение и могла поддерживать ток на низкой частоте.

Затем формируется импульс зажигания лампы, т.е. в течение 10 секунд каждую секунду будут посылаться импульсы зажигания. После этого делается задержка в 20 секунд и происходит переход на низкую частоту в 50 Гц. Затем проверяется наличие лампы и при ее отсутствии происходит отключение лампы, и возврат в начало на сброс и обратно начинается проверка всех условий.

После проверки наличия лампы организуется цикл, в котором осуществляется анализ состояний, где проверяем состояние температуры, напряжения на выходе ККМ, выходного напряжения на лампе и сетевого напряжения. Также в цикле вычисляем ШИМ и обрабатываем посылку, если она принята.

4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭПРА

4.1 Формирование слова состояния

Для того, чтобы организовать интерфейс связи с внешним управляющим модулем требуется разработать формы представления информации для обмена. Был разработан 9-байтный формат посылки. Общий вид посылки представлен на рисунке 4.1.

0	1	2	3	4	5	6	7	8
TYPE	STATE	P	T	Uacs	Uo	Ubus	Ui	CRC

Рисунок 4.1 – Общий вид посылки

Рассмотрим подробно каждый из байтов.

1. **TYPE** – тип устройства.

Общий вид: XXXX YYYY,

где XXXX – тип,

YYYY – модификация.

ЭПРА с максимальной мощностью 250 Вт закодируем следующим образом: 0001 0001.

2. **STATE** – переменная состояния, которая определяет, что происходит с лампой.

Бит 0: 1 – лампа включена, 0 – лампа выключена.

Бит 1: 1 – старая лампа (Uo > 160 В в течение 12 минут).

Бит 2: 1 – короткое замыкание на выходе (Uo < 12 В)

Бит 3: 1 – неисправность ключей (Uo > 230 В)

Бит 4: 1 – напряжение сети вне диапазона (<160 В или >270 В)

Бит 5: 1 – высокая температура

Бит 6: 1 – лампа не зажглась (Uo > 200 В, попытка перезапуска через 3 минуты)

Бит 7: 1 – не в норме напряжение Ubus (>420 В или <380 В)

3. **P** – требуемая выходная мощность лампы. Измеряется в пределах от 0 до 100%. 0% соответствует минимально допустимой мощности. Диммирование выходной мощности осуществляется в диапазоне от 40 до 100 % выходной мощности. Для нашего типа лампы устанавливаем пределы диммирования:100…250 Вт. Регулирование в указанном диапазоне осуществляется с шагом 10%. Результаты значений диммирования выходной мощности с шагом 10% представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения диммирования выходной мощности

0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
100	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250

В программе создаем константный массив Power[], элементами которого будут значения из таблицы 4.1:

const unsigned int Power[]={250, 235, 220, 205, 190, 175, 160, 145, 130, 115, 100};

Значение требуемой выходной мощности на лампе извлекаем из выше указанного массива по индексу массиву. Для того, чтобы извлечь значение мощность в В, необходимо умножить индекс массива мощности на 10. Часть программы для получения требуемой выходной мощности представлена ниже:

```
P = Power[0];
temp = Transmit[2];
crc = crc ^ temp;
Transmit[2] = 100;
crc = crc ^ 100;
Transmit[8] = ~crc;
```

Переменной P присваиваем значение из массива Power[0], затем в переменную temp записываем 2 байт посылки. После этого из crc вычитаем значение переменной temp и 2 байту посылки присваиваем 100%. Затем из crc вычитаем 100% и делаем инверсию каждого бита, новое значение записываем в 8 байт посылки.

4. **T** – температура.

Для того, чтобы сформировать массив перевода температуры, необходимо найти зависимость напряжения на входе АЦП от температуры.

Рассмотрим схему датчика температуры. Схема датчика температуры представлена на рисунке 4.2.

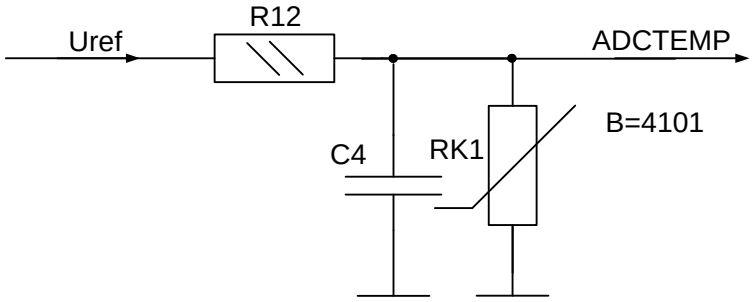


Рисунок 4.2 – Схема датчика температуры

На вход датчика температуры подается напряжение U_{ref}=5В с выхода стабилизатора напряжения. Найдем зависимость напряжения (на выходе датчика температуры) от температуры.

Зависимость напряжения от сопротивления имеет вид:

$$U = \frac{U_{ref}}{R_t + R_{12}} R_t. \tag{4.1}$$

Зависимость сопротивления от температуры имеет вид:

$$R_t = R_{k1} e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r})}, \tag{4.2}$$

где T_r=25 ^{0}C – температура;

R_{k1}=33 кОм – сопротивление термистора NCP18WB333K03RB при 25 ^{0}C;

R_{12}=10 кОм – сопротивление составной части делителя;

B=4101 – постоянная термистора NCP18WB333K03RB при 25 ^{0}C;

U_{ref}=5В – напряжение, подаваемое на вход.

Напряжение U представим в отсчетах, для этого:

$$U_{отс} = U \cdot \frac{256}{5}. \quad (4.3)$$

Построим зависимость напряжения U на входе АЦП от температуры T. График зависимости представлен на рисунке 4.3.

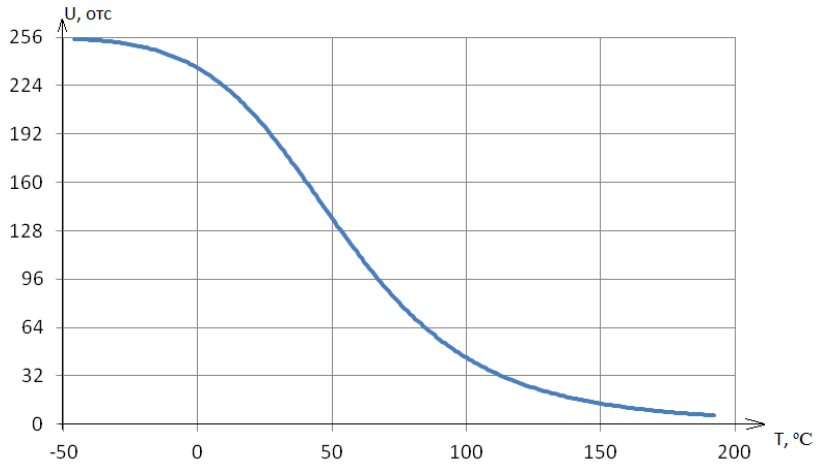


Рисунок 4.3 – Зависимость напряжения U на входе АЦП от температуры T

Измеренное значение температуры передается в форме: T °C+50, т.е. -50 °C соответствует T=0 °C, 205 °C - T=255. Перевод осуществляется табличным методом.

```
// Массив перевода температуры
unsigned char ToC50[]={
253, 234, 221, 211, 203, 196, 191, 186, 182, 178, 174, 171, 168, 165, 162,
160, 158, 156, 153, 152, 150, 148, 146, 145, 143, 141, 140, 139, 137, 136,
134, 133, 132, 131, 130, 128, 127, 126, 125, 124, 123, 122, 121, 120, 119,
118, 117, 116, 115, 114, 114, 113, 112, 111, 110, 109, 108, 108, 107, 106,
105, 104, 103, 103, 102, 101, 100,  99,  99,  98,  97,  96,  95,  95,  94,
 93,  92,  91,  91,  90,  89,  88,  87,  87,  86,  85,  84,  83,  82,  82,
 81,  80,  79,  78,  77,  76,  75,  74,  73,  72,  71,  70,  69,  68,  67,
 66,  65,  63,  62,  61,  59,  58,  56,  55,  53,  51,  49,  47,  45,  42,
 39,  36,  32,  26,  19,  4};
```

```
temp = ADC_DRH;
int h = temp >> 1;
h = h - 2;
if(h<0) h=0;
if(h>125) h=125;
temp = ToC50[h];
SetTransmitByte(tk, 3);
```

Переменной temp присваиваем результат АЦП, затем делим на 2 и записываем в переменную h. Чтобы выровнять краевые точки вычитаем 2. Зам из массива извлекаем значение с данным индексом h.

5. **Uacs** - сетевое напряжение.

График изменение сетевого напряжения *Uacs* представлен на рисунке 4.4.

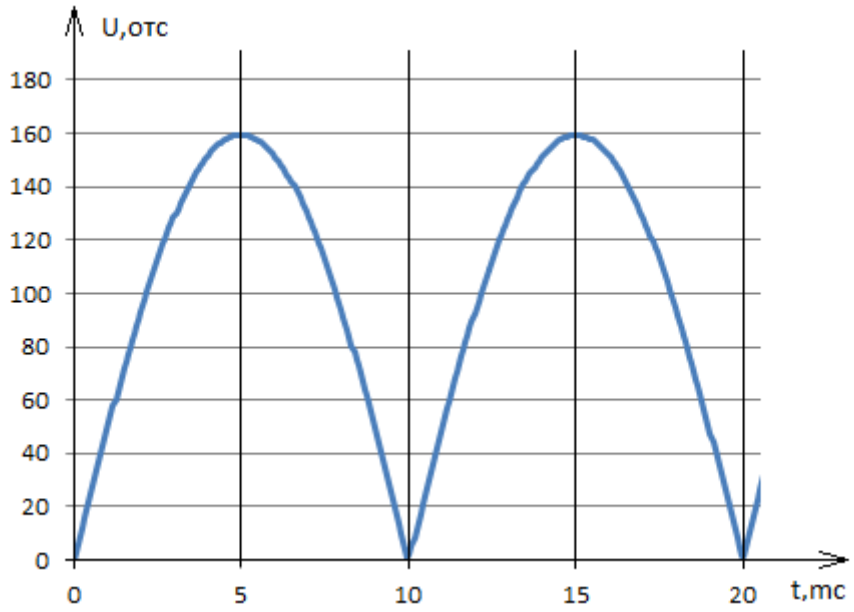


Рисунок 4.4 – График изменение сетевого напряжения *Uacs*

Из графика видно, что в течение полупериода $\frac{T}{2} = 10мс$ сетевое напряжение Uacs меняется в пределах от 0 до 159 отсчётов. Необходимо определить сумму отсчетов для разных амплитуд напряжения. Для этого ждем 1.5 *мс* и измеряем сумму через 62 мкс 128 отсчетов, так получаем необходимые 10 мс.

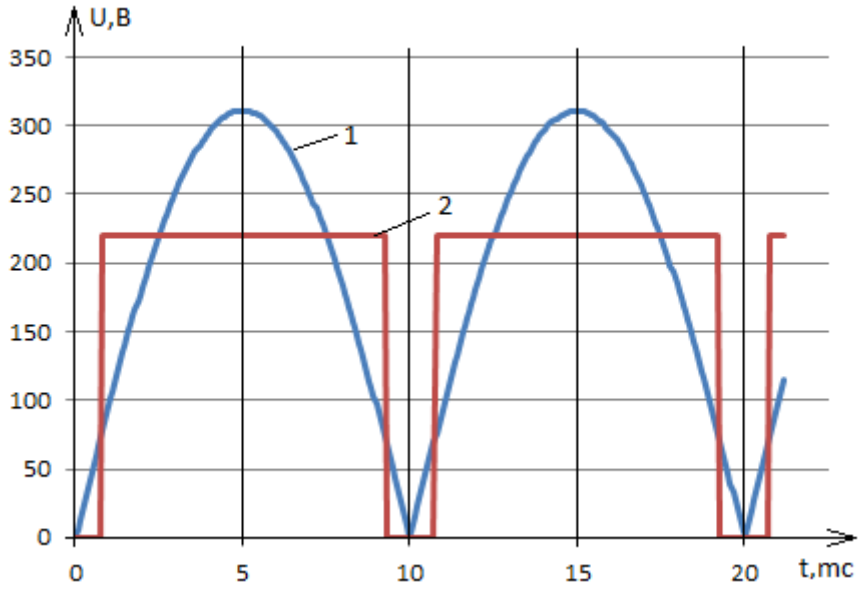


Рисунок 4.5 – График синхронизации сетевого напряжения *Uacs*

1 - сетевое напряжение *Uacs*; 2 – сигнал сихронизации

В результате вычисления зависимости суммы 128 отсчетов от различных амплитуд напряжения получили линейную зависимость, которую аппроксимировали уравнением $S = 141.01 \cdot U - 855.84$. График зависимости представлен на рисунке 4.6.

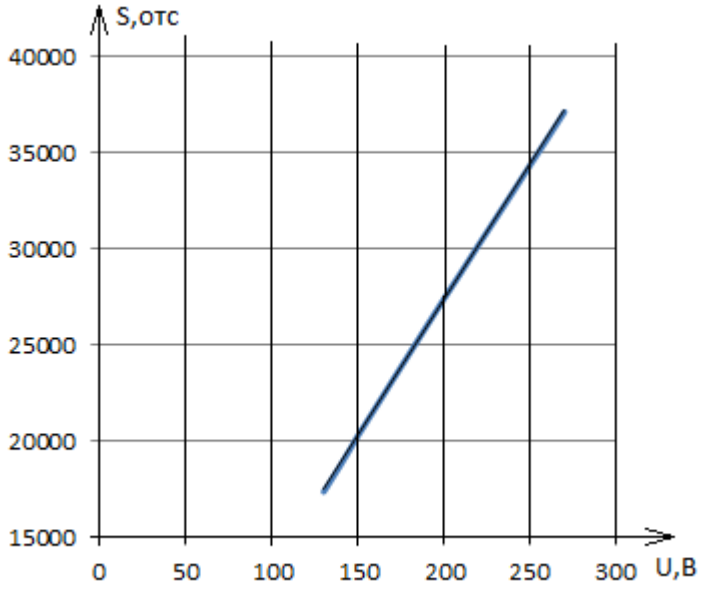


Рисунок 4.6 – График зависимости суммы 128 отсчетов от различных амплитуд напряжения

Часть программы для вычисления сетевого напряжения представлена ниже:

```
        TIM4_CNTR = 0;
for(i = 0; i < 6; i++)
  {
   while(TIM4_CNTR < 250);
   TIM4_CNTR = 0;
  }
 Uacs = 0;
 for(i=0;i<128;i++)
  {
   ADC_CSR = 0x01;
   ADC_CR1 |= 0x01;
   while((ADC_CSR & 0x80) == 0);
   temp = ADC_DRH;
   while(TIM4_CNTR < 62);
   TIM4_CNTR = 0;
   Uacs += temp;
  }
 uo = (long int)Uacs * 29;
 uo = uo >> 8;
 uo = uo >> 3;
 uo = uo - 50;
 if(uo < 0) uo = 0;
 temp = (unsigned char)uo;
 SetTransmitByte(temp, 4);
```

Все выше описанные действия реализуются в программе, т.е. делаем задержку в 1.5 мс, затем осуществляем выбор канала и запускаем АЦП и ждем оканчания преобразования. После этого в переменную temp записывается результат АЦП и после 62 мкс. считаем сумму отсчетов. Затем в переменную uo

записываем сумму отсчетов умноженную на коэффциент, после этого uo сдвигаем на 8 разрядов, а затем на 3 разряда. Измеренное действующее значение сетевого напряжения передается в форме: uo-50, В. Значение сетевого напряжения записываем в 4 байт посылки.

6. **Uo** – выходное напряжение на лампе.

Часть программы для вычисления выходного напряжения на лампе представлена ниже:

```
ADC_CSR = 0x00;     ADC_CR1 |= 0x01;
while((ADC_CSR & 0x80) == 0);
temp = ADC_DRH;
h = temp;
h = h * 125;
tk = h >> 6;
SetTransmitByte(tk, 5);
```

Вначале осуществляется выбор канала, затем запускается АЦП и ожидание окончания преобразования. После этого в переменную temp записывается результат АЦП.

Напряжение необходимо перевести из отсчетов в вольты. Для этого используем формулу:

$$Uo = \frac{Uoi \cdot 5}{256 \cdot 0.01} = \frac{Uoi \cdot 125}{64}, \tag{4.4}$$

где Uoi – напряжение в отсчетах.

Напряжение считаем за 256 отсчетов с учетом коэффициента K=0.01, полученного при помощи делителя напряжения. В результате получили напряжение, которое необходимо передать в посылке.

В программе это преобразуется следующим образом: переменную temp умножили на 125 и сдвинули на 6 разрядов, т.е. поделили на 64. Затем записываем получившееся напряжение в 5 байт посылки.

7. **Ubus** – напряжение на выходе ККМ (в норме 400 В).

```
ADC_CSR = 0x03;
ADC_CR1 |= 0x01;
while((ADC_CSR & 0x80) == 0);
temp = ADC_DRH;
h = temp * 125;
tk = h >> 7;
SetTransmitByte(tk, 6);
```

В программе *Ubus* измеряется как результат АЦП. Вначале осуществляется выбор канала, затем запускается АЦП и ожидание окончания преобразования. После этого в переменную temp записывается результат АЦП.

Напряжение необходимо перевести из отсчетов в вольты. Для этого используем формулу:

$$Ubus = \frac{Ubusi \cdot 5}{256 \cdot 0.01 \cdot 2} = \frac{Ubusi \cdot 125}{128}, \quad (4.5)$$

где *Ubusi* – напряжение в отсчетах;

$Ubus$ - напряжение в вольтах.

Напряжение считаем за 256 отсчетов с учетом коэффициента К=0.01, полученного при помощи делителя напряжения. В результате получили напряжение, которое необходимо передать в посылке.

В программе это преобразуется следующим образом: переменную temp умножили на 125 и сдвинули на 7 разрядов, т.е. поделили на 128. Затем записываем получившееся напряжение в 6 байт посылки.

8. **Ui** - управляющее напряжение. Передается только в режиме управления напряжением. В данном случае является резервным (равным нулю).

9. **CRC**. Контроль четности – исключающее ИЛИ байтов 1…8:

$$CRC = TYPE \oplus STATE \oplus P \oplus T \oplus Uacs \oplus Uo \oplus Ubus \oplus Ui \oplus FF \quad (4.6)$$

Формирование слова записи

1. **STATEW**. Слово состояния определяет структуру следующего байта.

Бит 0: 1 – нагрузка включена, 0 – нагрузка выключена.

Бит 1: 1 – уставка тока (резервный)

Бит 2: 1 – режим работы

Слово состояния должно иметь не более 1 единицы.

2. **VAR**. Байт, имеющий различное значение в зависимости от слова состояния.

Бит 0 = 1: **VAR** = P, % (0% соответствует минимальной мощности)

Бит 1 = 1: **VAR** = I.

Бит 2 = 1: **VAR** = MODE.

MODE = 1 – режим управления внешним напряжением

MODE = 2 – режим полупериодного управления

MODE = 3 – I2C – связь

3. **CRC**. Контроль четности – исключающее ИЛИ байтов 1, 2:

$$CRC = STATEW \oplus VAR \oplus FF \quad (4.7)$$

4.2 Описание функций

Функция задержки

Данная функция обеспечивает приостановку выполнения определенных операций в программе на необходимое время. Время измеряется в миллисекундах.

```
void delay(unsigned long int ms)
 {
  long int del;
  del = ms << 2;
```

```
 TIM4_CNTR = 0;
 while(del > 0)
  {
   while(TIM4_CNTR <250);
   del--;
   TIM4_CNTR = 0;
  }
}
```

Функция установки состояния

Когда меняется состояние одного из битов переменной STATE изменятся состояние CRC. Для того, чтобы не забывать его каждый раз менять и необходима данная функция.

```
void SetState(unsigned char flag)
{
 crc = crc ^ STATE;
 STATE |= flag;
 Transmit[1] = STATE;
 crc = crc ^ STATE;
 Transmit[8] = ~(crc);
}
```

Вначале вычитаем из старого значение CRC старый бит STATE, в бите STATE ставим flag, который нам нужен. Затем записывем в 1 байт посылки новое состояние STATE и из нового CRC вычитаем новое STATE. И инверсию нового значения CRC записываем в посылку.

Функция очистки состояния

Данная функция используется для того, чтобы очистить данные о ошибке состояния, перед тем, как записать новое состояние.

```
void ClearState(unsigned char flag)
{
```

```
 crc = crc ^ STATE;
 STATE &= ~flag;
 Transmit[1] = STATE;
 crc = crc ^ STATE;
 Transmit[8] = ~(crc);
}
```

Функция отключение

Данная функция отключает преобразователь, который формирует 50 Гц на выходе и снимает флаг состояния о том, что лампа включена.

```
void Off(void)
{
 PC_ODR &= ~0x20;    // BUCKdis = 0;
 TIM1_OISR = 0;
 TIM1_BKR &= ~0x80;
 ClearState(0x01);
}
```

Функция установки значения байта

Данная функция необходима для установки значения передаваемого байта в слово состояния. Параметрами данной функции являются *unsigned char Value* – значение байта, *unsigned char Index* – номер байта.

```
void SetTransmitByte(unsigned char Value, unsigned char Index)
{
 unsigned char temp;
 temp = Transmit[Index];
 crc = crc ^ temp;
 Transmit[Index] = Value;
 crc = crc ^ Value;
 Transmit[8] = ~(crc);
}
```

В большинстве современных ЭПРА контроль выходной мощности осуществляется путем обработки информации с датчика тока и датчика напряжения. Использование физического датчика тока ведет к возрастанию энергетических потерь, уменьшению КПД устройства и увеличению стоимости.

Для реализации функции управления мощностью в составе понижающего преобразователя предлагается структура косвенного измерения тока. Схема управления мощностью нагрузки представлена на рисунке 4.7

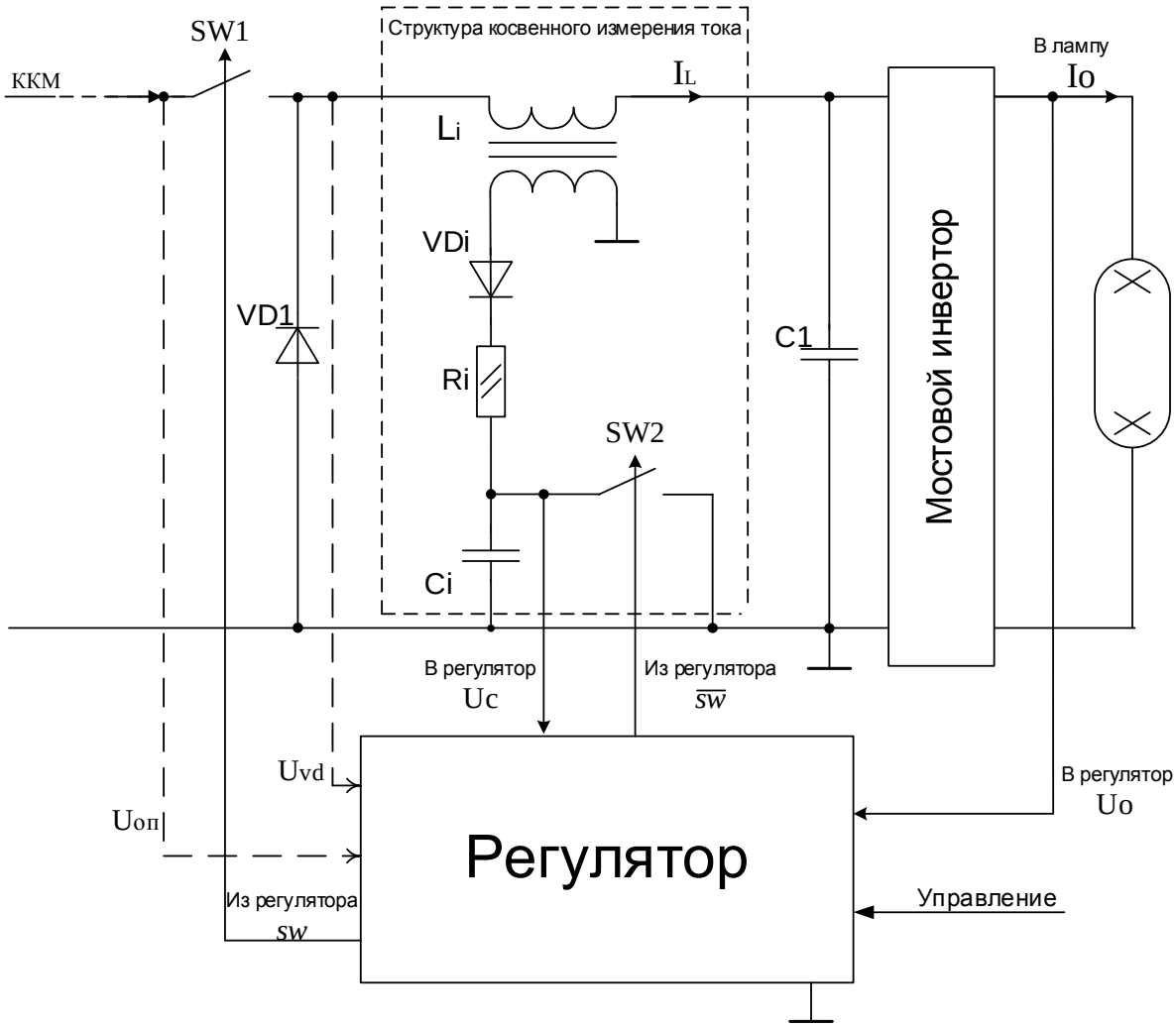


Рисунок 4.7 – Схема управления мощностью нагрузки.

Структурная схема управления мощностью состоит из понижающего преобразователя и мостового инвертора, осуществляющего преобразование постоянного тока в прямоугольный переменный.

От классического понижающего преобразователя данная схема отличается тем, что у дросселя L_i имеется дополнительная обмотка для создания модели изменения тока. Входной ключ коммутируется выходным сигналом регулятора *sw* по методу нулевого тока (ZCS – zero current switching) и дополнительно реализуемому методу нулевого напряжения на ключе. Суть реализации метода нулевого напряжения сводится к анализу возникновения резонансного процесса по напряжению в паре диод VD1 – дроссель L_i. При прекращении тока дросселя напряжение на диоде VD1 резко меняет полярность и напряжение на ключе SW1 стремится к нулю, и в этот момент происходит переключение.

Формирование подаваемого на лампу тока ограничивается двумя сигналами: сигналом, характеризующим максимальную амплитуду тока, и сигналом, характеризующим нулевой уровень тока. Диаграммы мгновенного тока дросселя и управляющего сигнала *sw* изображены на рисунке 4.8.

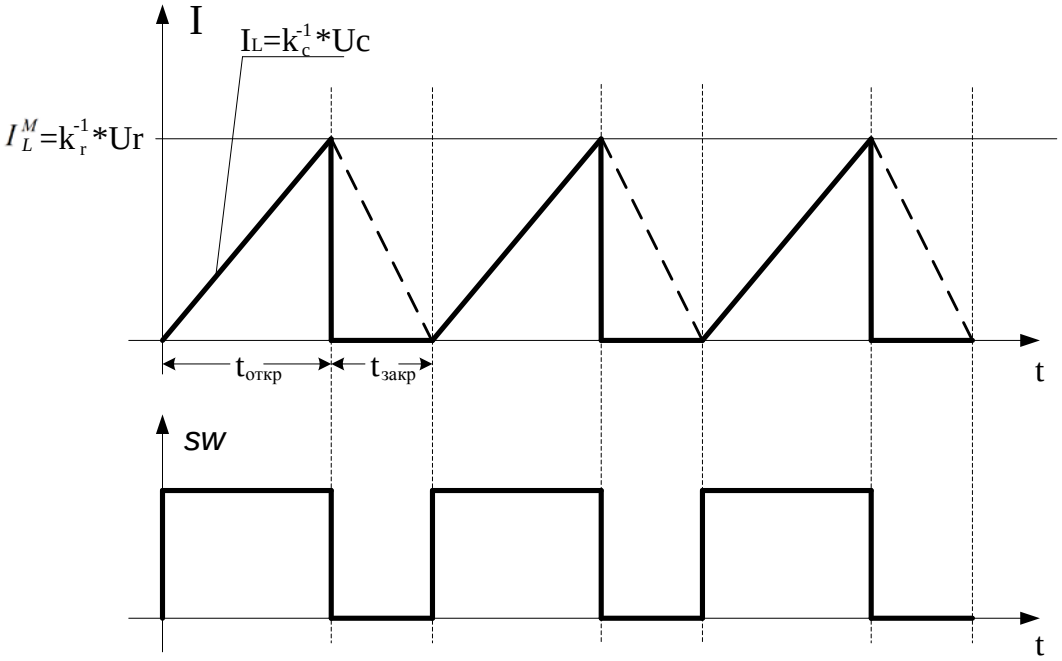


Рисунок 4.8 – Диаграммы мгновенного тока дросселя (сверху) и управляющего сигнала *sw* (снизу)

Емкостной фильтр C1 преобразует пилообразный ток дросселя I_L в постоянный ток I_0, равный среднему значению тока дросселя:

$$I_0 = \frac{I_L^M}{2}, \tag{4.8}$$

где I_L^M – максимальный пилообразный ток дросселя, А;

I_0 – постоянный ток дросселя, А.

Сигнал, ограничивающий максимальное значение тока лампы, формируется по величине выходного напряжения, исходя из условия стабилизации выходной мощности:

$$I_L^M = 2 \cdot I_0 = 2 \cdot \frac{P_0}{U_0}, \tag{4.9}$$

где P_0 – это заданная мощность лампы, Вт;

U_0 - напряжение на лампе, В.

Напряжение на лампе U_0 является медленно меняющейся величиной, т.е. и уровень I_L^M будет медленно меняться для стабилизации требуемой мощности лампы.

Для измерения мгновенного тока используется косвенный метод. Суть его заключается в следующем.

Анализ мгновенного значения тока дросселя производится по электрическим параметрам динамической модели дросселя, которая представляет собой интегрирующую цепочку с поданным на нее эквивалентным напряжением обмотки.

Метод построения динамической модели сводится к следующему.

Учитывая, что при пренебрежимо малом динамическом сопротивлении обмоток, ток обмотки и напряжение на обмотке связаны дифференциальной зависимостью:

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt}, \tag{4.11}$$

откуда

$$I_L(t) = \frac{1}{L_i} \int_0^t U_{L1}(t)dt + i_L(0). \tag{4.12}$$

Модель тока дросселя будет представлять собой интегрирующую RC-

цепочку с масштабируемыми коэффициентами:

$$U_C = \frac{1}{R_i \cdot C_i} \int_0^t U_{L2}(t)dt + u_c(0). \tag{4.13}$$

Учитывая, что:

$$U_{L1} = U_{L2} \frac{\omega_2}{\omega_1} = U_{L2} \cdot n_i, \tag{4.14}$$

получим:

$$U_C = \frac{n_i}{R_i \cdot C_i} \int_0^t U_{L1}(t)dt + u_c(0). \tag{4.15}$$

Синхронизация динамической модели с физическим процессом в реальном дросселе использует ключ SW2, формирующий нулевые начальные условия интегрирования на каждом полупериоде. Учитывая, что $i_L(0)$ также равно нулю, что определяется алгоритмом работы регулятора, соотношение (4.15) поделим на соотношение (4.12) и получим:

$$\frac{U_c(t)}{I_L(t)} = \frac{\frac{n_i}{R_i \cdot C_i} \int_0^t U_{L2}(t)dt}{\frac{1}{L_i} \int_0^t U_{L1}(t)dt} = \frac{L_i \cdot n_i}{R_i \cdot C_i}. \tag{4.16}$$

Соотношение (4.16) представляет собой масштабный коэффициент, зависящий от значений пассивных элементов. Таким образом, для анализа мгновенного значения тока дросселя на фронте нарастания можно использовать выходное напряжение интегрирующей цепи, взятое с масштабным коэффициентом:

$$K_c = \frac{L_i \cdot n_i}{R_i \cdot C_i}. \tag{4.17}$$

Поскольку в регулятор будет подаваться напряжение $U_c(t)$, эквивалентное уровню тока дросселя, то для ограничения максимума тока требуется ввести напряжение, эквивалентное ему, допустим U_r:

$$U_r = K_r I_0^M = 2 \cdot K_r \frac{P_0}{U_0}. \tag{4.18}$$

Подсчет U_r и сравнение его с мгновенным током реализованы в регуляторе. На рисунке 4.9 представлена функциональная схема регулятора тока.

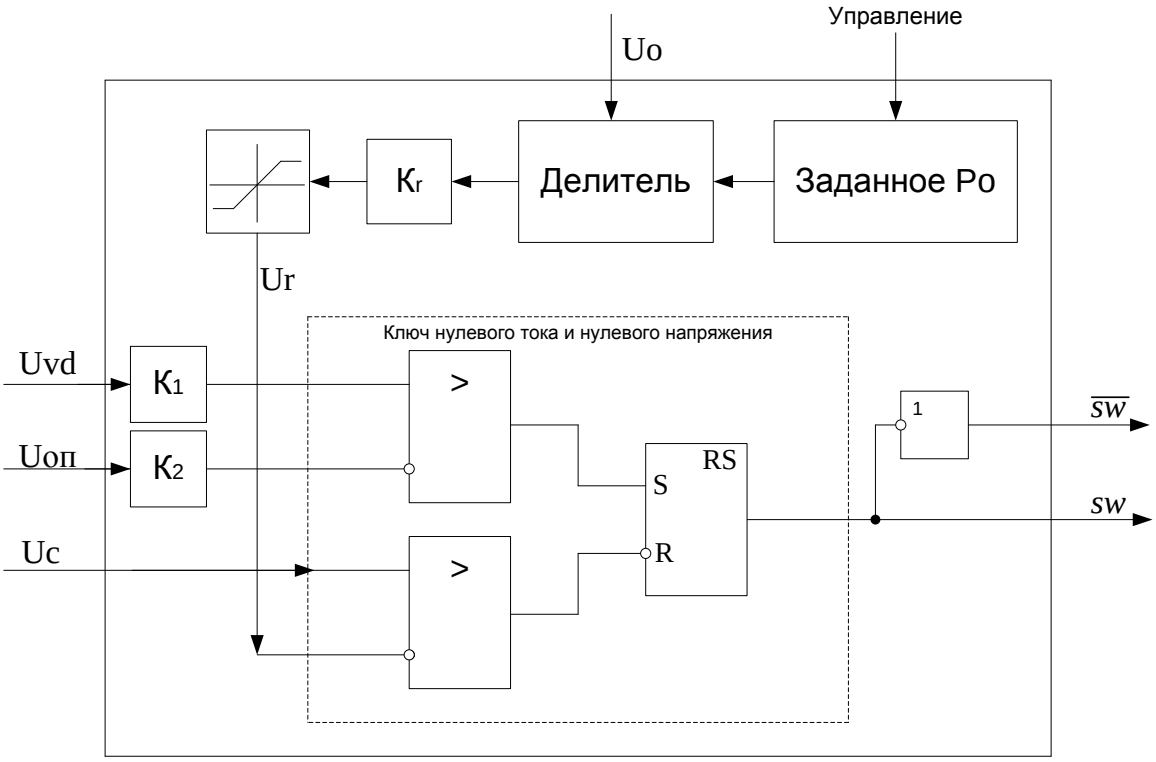


Рисунок 4.9 – Функциональная схема регулятора тока.

Теоретически, коэффициент преобразования мгновенного тока K_c и коэффициент максимального тока K_r должны быть равны. Однако реализация метода косвенного измерения тока предполагает процедуру коррекции масштабного коэффициента, поскольку применяемые пассивные компоненты имеют некоторый разброс параметров.

Как видно из рисунка 4.9, эквивалентная величина максимума тока имеет верхний и нижний пределы, что позволяет реализовать функцию защиты нагрузки.

Внешний управляющий сигнал регулятора позволяет изменять мощность, формируемую ЭПРА в нагрузке, реализуя тем самым функцию диммирования светового потока.[]

4.3 Формирование ШИМ для управления мощностью ЭПРА

Широтно – импульсная модуляция (ШИМ) – это импульсный сигнал постоянной частоты и переменной скважности, т.е. отношения периода следования импульса к длительности импульса. С помощью задания скважности можно менять среднее напряжение на выходе ШИМ. На рисунке 4.10 изображен ШИМ.

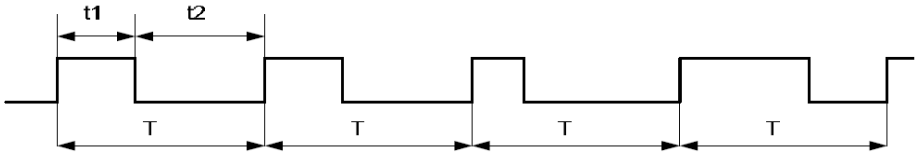


Рисунок 4.10 – Широтно – импульсная модуляция

Для формирования ШИМ необходимо рассчитать коэффициент заполнения ШИМ. На рисунке 4.11 представлена схема формирования ШИМ.

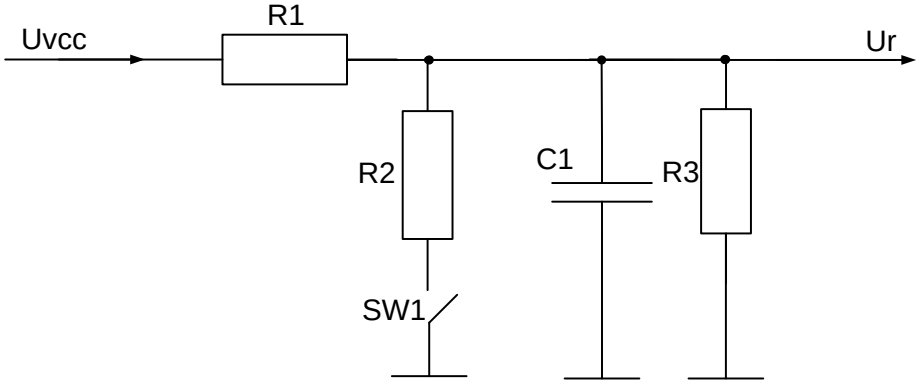


Рисунок 4.11 – Схема формирования ШИМ

Составим уравнение по 1 закону Кирхгофа:

$$\frac{Uvcc - Ur}{R1} = \frac{Ur}{R3} - \frac{Ur}{R2} \cdot \lambda, \qquad (4.19)$$

где Uvcc=5 В – напряжение на входе ШИМ;

Ur – среднее напряжение на выходе ШИМ, В;

λ – коэффициент заполнения ШИМ в диапазоне [0;1];

R1, R2, R3 – сопротивления, Ом.

Необходимо найти значения сопротивлений R2 и R3 при:

R1=18 кОм;

U_{rmax}= 2.64 В – максимальное напряжение на выходе ШИМ при λ=0;

U_{rmin}= 0.87 В – минимальное напряжение на выходе ШИМ при λ=1.

Значение сопротивления R3 найдем из выражения (4.19) при условии, что λ=0:

$$R3 = \frac{R1 \cdot U_{r\max}}{U_{vcc} - U_{r\max}} = 20 \cdot 10^3 Ом. \quad (4.20)$$

Значение сопротивления R2 найдем из выражения (4.19) при условии, что λ=1:

$$R2 = \frac{R1 \cdot R3 \cdot U_{r\min}}{R3 \cdot U_{vcc} - (R1 + R3) \cdot U_{r\min}} = 4.7 \cdot 10^3 Ом. \quad (4.21)$$

Из уравнения (4.19) найдем зависимость коэффициента заполнения ШИМ от среднего напряжения на выходе ШИМ $\lambda(U_r)$:

$$\lambda(U_r) = \frac{R2 \cdot U_{vcc}}{R1 \cdot U_r} - \frac{R2 \cdot (R3 + R1)}{R3 \cdot R1}. \quad (4.22)$$

Выразим среднее напряжение на выходе ШИМ с помощью соотношения (4.18) с учетом (4.17) и получим зависимость среднего напряжение на выходе ШИМ от напряжения на лампе:

$$U_r(U_0) = \frac{2 \cdot P_0 \cdot L_i \cdot n_i}{U_0 \cdot R_i \cdot C_i}. \quad (4.23)$$

Подставим выражение (4.23) в (4.22) и получим:

$$\lambda(U_0, P_0) = \frac{R3 \cdot U_{vcc} \cdot U_0 \cdot R_i \cdot C_i}{R1 \cdot 2 \cdot P_0 \cdot L_i \cdot n_i} - \frac{R3 \cdot (R2 + R3)}{R2 \cdot R3}, \quad (4.24)$$

где U_0 – напряжение на лампе, В;

R_i=51 кОм – сопротивление;

C_i =1 нФ – емкость конденсатора;

L_i =330 мкГн – индуктивность дросселя;

P_0=250 Вт – заданная мощность лампы;

n_i =0.091

Выражение (4.24) представим в следующем виде:

$$\lambda(U_0, P_0) = K1\frac{U_0}{P_0} - K2, \quad (4.25)$$

где $K1$ и $K2$ – масштабные коэффициенты. Вычислим данные коэффициенты:

$$K1 = \frac{R2 \cdot U_{vcc} \cdot R_i \cdot C_i}{R1 \cdot 2 \cdot L_i \cdot n_i} = 1.11. \quad (4.26)$$

$$K2 = \frac{R3 \cdot (R2 + R3)}{R2 \cdot R3} = 0.496. \quad (4.27)$$

Масштабируем данные коэффициенты для того, чтобы повысить точность определения и переводим в отсчеты:

$$k1 = K1 \frac{500 \cdot 1024 \cdot 1024}{256 \cdot 128} = 17755.555556. \quad (4.28)$$

$$k2 = K2 \cdot 1024 \cdot 1024 = 520210.204. \quad (4.29)$$

Коэффициенты, вычисленные в выражении (4.28) и (4.29) используем в программе при расчете коэффициента заполнения ШИМ. Часть программы для вычисления коэффициента заполнения ШИМ представлена ниже:

```
lambda = k1 * UO;
lambda = lambda / P;
lambda = lambda - _k2;
lambda = lambda >> 10;
if(lambda > 1023) lambda = 1023;
if(lambda < lambda0)    lambda = lambda0;
if(PWMtemp < lambda)
  {
   PWMtemp = PWMtemp + 5;
   if(PWMtemp > lambda)
     PWMtemp = lambda;
   if(PWMtemp > 1023)
     PWMtemp = 1023;
  }
else
if(PWMtemp > lambda)
  {
   PWMtemp = PWMtemp - 5;
```

```
    if(PWMtemp < lambda)
      PWMtemp = lambda;
    if(PWMtemp < lambda0)
      PWMtemp = lambda0;
    if(PWMtemp < MAX_PWM)
      PWMtemp = MAX_PWM;
   }
  temp = (PWMtemp & 0x3F00) >> 8;
  TIM2_CCR1H = temp;
  temp = PWMtemp & 0xFF;
  TIM2_CCR1L = temp;
 }
```

В данном случае *lambda* – это коэффициент заполнения ШИМ, который вычисляем по формуле (4.25) с учетом значений коэфффициентов (4.28) и (4.29). Затем *lambda* сравниваем с *PWMtemp* – это реальный коэффициент заполнения ШИМ. И после этого старшие байты записываем в *TIM2_CCR1H*, а младшие байты записыавем в *TIM2_CCR1L*.

Расчет коффициентов делителя напряжения

На вход микроконтроллера STM8S105K4T6 допустимо подавать напряжение питания $U_{пит}$=5 В, поэтому необходимо преобразовать напряжения с выхода ККМ, с выхода мостового инвертора и с выхода сетевого фильтра. Для преобразования к допустимому напряжению используем делитель напряжения. Для удобства выберем одинаковые коэффициенты. На рисунке 4.12 изображена схема делителя напряжения ККМ.

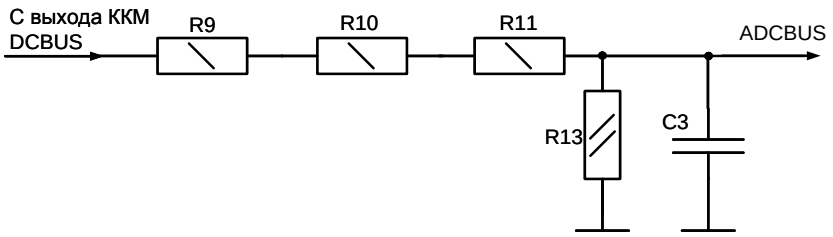


Рисунок 4.12 – Схема делителя напряжения ККМ

Рассчитаем коэффициент делителя:

$$K1 = \frac{R13}{R9 + R10 + R11} = 0.01, \quad (4.31)$$

где R9=R10=R11=330 кОм – сопротивления делителя напряжения;

R13=10 кОм – сопротивление делителя напряжения.

Рассчитаем коэффициент делителя сетевого напряжения, схема представлен на рисунке. Конденсатор C1 используем для сглаживания пульсаций, а диоды VD1 иVD2 для выпрямления сетевого напряжения.

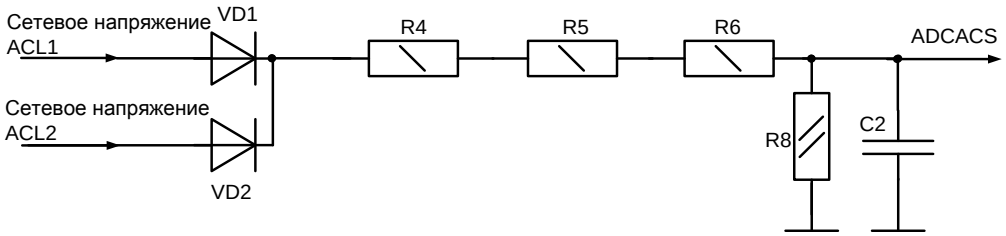


Рисунок 4.15 – Схема делителя сетевого напряжения

Рассчитаем коэффициент делителя:

$$K2 = \frac{R8}{R4 + R5 + R6} = 0.01, \quad (4.32)$$

где R4=R5=R6=330 кОм – сопротивления делителя напряжения;

R8=10 кОм – сопротивление делителя напряжения.

На рисунке изображена схема делителя напряжения мостового инвертора.

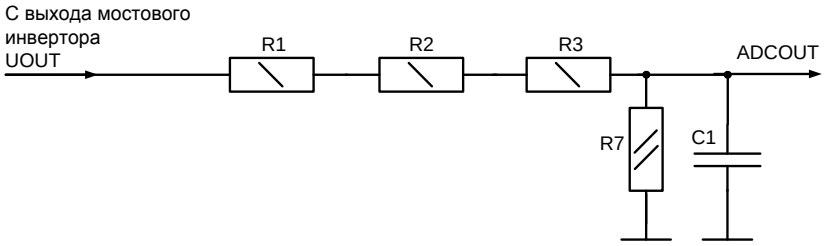


Рисунок 4.16– Схема делителя напряжения мостового инвертора

Рассчитаем коэффициент делителя:

$$K2 = \frac{R7}{R1 + R2 + R3} = 0.01, \quad (4.33)$$

где R2=R3=68 кОм – сопротивления делителя напряжения;

R1=62 кОм – сопротивление делителя напряжения.

R7=2 кОм – сопротивление делителя напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы был проведена разработка ЭПРА с низкочастотным выходным током. Исследованы характеристики газоразрядных ламп. Был произведен выбор и настойка микроконтроллера для управления ЭПРА. Создан алгоритма работы ЭПРА. Так же была проведена работа по формированию слова состояния: Был разработан 9-байтный формат посылки. Формирование ШИМ для управления мощностью ЭПРА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга, – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Знак, 2006. – 972 с.

2. Газоразрядные лампы высокого давления / Росэнергосвет. – http://rsvet.org/info/gazorazryadnye_lampy_vysokogo_davleniya.html /2009.

3. Поляков, В.Д. Моделирование электрической проводимости натриевой лампы высокого давления / В.Д. Поляков, Е.А. Обжерин. // Вестник МЭИ. – 2003. – №4. – с. 86–91.

4. Литвинов, В. С. Разрядные источники оптического излучения (расчет и оптимизация параметров) / В. С. Литвинов – М. : Издательство МЭИ, 2000. – 156 с.

5. Краснопольский, А.Е. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп / А.Е. Краснопольский, В.Б. Соколов, А.М. Троицкий. – М.: Энергоатомиздан, 1988. – 207 с.

6. Кончуковский, Д.А. Моделирование электрических параметров газоразрядной лампы / Д.А. Кончуковский. // Светотехника. – 2009. – №4. – с. 12–15.

7. Подельский

8. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы / Д. Уэймаус; пер. с англ. под ред. Г.Н. Рохлина и М.И. Фугонфилова. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

9. Ефимкина, В.Ф. Светильники с газоразрядными лампами высокого давления / В.Ф. Ефимкина, Н.Н. Софронов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.

10. Индуктивные балластные дроссели. – http://www.mosvet.ru/page139.html.

11. Васильев, А.Б. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств / А.Б. Васильев, В.М. Худяков, В.К. Харбузов // Силовая электроника. – 2004. – №2. – с. 72–77.

12. Ефстифеев, А.А. Особенности построения балластов для ламп высокого давления / А.А. Ефстифеев // Силовая электроника. – 2008. – №3. – с. 132–136.

13. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройтсв / Г.И. Волович, – М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2005. – 528 с.

14. Едренкин, Е.Д. Конструкторско-технологическое обеспечение производства электронных средств: Учебное пособие / Э.Д. Едренкин, Н.С. Колмакова, – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. –144 с.

15. Сетевые методы планирования и управления: методические указания /сост. В.С. Зинкевич, Л.А. Баев, Н.П. Мешковой. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998. – 22 с.