

УДК 621.341.572: 004.94

А.В. Иванов, А.В. Фёдоров, Т.Н. Зайченко, И.В. Целебровский

Исследование и разработка элементов и узлов системы управления светодиодным источником света с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками

Сформулированы основные требования к источнику электропитания светодиодного осветительного прибора, проведён анализ возможных технических решений, представлены схема силовой части и результаты испытаний драйвера.

Ключевые слова: высокояркий светодиод, источник электропитания, инвертор, светодиодный драйвер, модель.

Актуальность разработки светодиодных осветительных приборов

Энергоэффективность и энергосбережение являются приоритетными направлениями развития экономики всех промышленно развитых стран. Один из путей повышения энергоэффективности связан со снижением расходов на освещение, поскольку на его долю, согласно данным Международного энергетического агентства, приходится примерно 16...19% общего мирового расхода электроэнергии. В настоящее время это обеспечивается за счет перехода на новые осветительные приборы светодиодного типа. Так, замена традиционных ламп накаливания в быту и сфере жилищно-коммунального хозяйства на светодиодные позволяет сократить потребление электроэнергии в этих областях светильниками на 80%, а замена газоразрядных светильников в производственных помещениях позволяет сократить потребление электроэнергии на освещение примерно в 2 раза [1].

Помимо очевидного преимущества, связанного с экономией электроэнергии, применение светодиодных светильников имеет ряд других достоинств: они обладают высокой световой отдачей и долговечностью; в их составе отсутствуют вредные вещества, в связи с чем не требуется утилизация, которая является серьёзной проблемой для люминесцентных источников света. Светодиоды обеспечивают лучшее качество освещения, связанное с отсутствием мерцания и стробоскопического эффекта, что очень важно при освещении рабочих помещений и в опасных зонах, особенно при работе со станками. Светодиодные светильники имеют очень большой срок службы (до 100000 часов) [2] и не содержат в своём составе узлов, подлежащих периодической замене. В ряде случаев данная особенность является существенным преимуществом и делает применение светодиодов наиболее выгодным, несмотря на высокую начальную стоимость. Это имеет место, например, при освещении лифтов или уличном освещении, где проводить регулярное обслуживание проблематично. Так, в США и Европе к 2008 г. в 65% всех светофоров и фонарей для освещения тротуаров лампы накаливания были заменены на светодиоды [2]. Для России данная задача еще не решена и по-прежнему является актуальной. В настоящей работе рассматриваются вопросы исследования и разработки средств электропитания для осветительных приборов на базе высокоярких светодиодов промышленного и бытового назначения.

Организация электропитания светодиодного осветительного прибора

Помимо светодиодов, в состав светодиодного светового прибора входят [2]:

- оптические устройства – линзы и средства нацеливания для направления, смешивания и рассеивания света;
- устройства для отвода тепла (вентиляционные отверстия и радиаторы);
- устройства электропитания и управления.

С целью выделения источников электропитания, предназначенных именно для светодиодного освещения, из огромного числа производимых источников электропитания для электронной аппаратуры преобразователь напряжения с устройством управления называют драйвером светодиодов или просто драйвером. Данная терминология используется и в настоящей работе.

Драйвер является важной частью полупроводникового светильника. Он обеспечивает нормальную работу, стабильные светотехнические характеристики и надежность осветительного устройства в целом.

Существует два основных типа светодиодов: индикаторные и осветительные. Осветительные высокояркие светодиоды – это надежные мощные устройства со световой отдачей более 100 лм/Вт, способные обеспечить нужный для потребителя уровень освещенности. Выделяются два типа осветительных светодиодов: RGB и люминофорные. При использовании метода RGB белый свет получается при объединении излучения красного, зеленого и синего светодиодов [3]. Люминофорные технологии получения белого света предполагают использование одного светодиода, синего или ультрафиолетового, в комбинации с желтым люминофорным покрытием. Комбинация фотонов синего и желтого цвета создает белый свет. Несмотря на ряд преимуществ, применение RGB-светодиодов приводит к серьезному усложнению конструкции как источника питания, так и всего светильника. В энергосберегающих источниках света, для которых ведется разработка драйвера, используются люминофорные светодиоды.

Для нормального функционирования осветительный прибор должен быть снабжен качественным источником электропитания, соответствующим требованиям высокоярких светодиодов к параметрам питающего напряжения. К ним относятся:

- номинальное напряжение – от 1,2 до 4,5 В;
- номинальный ток – от 0,35 до 2 А.

Особенностями светодиодов являются зависимость светотехнических характеристик от протекающего тока и низкое напряжение питания. Вольт-амперная характеристика светодиода аналогична характеристике обычного кремниевого диода. Рабочая точка располагается на прямой ветви характеристики. В связи с пониженным напряжением питания светодиода в источниках электропитания, работающих от сети 220 В 50 Гц, приходится гасить излишек напряжения, причём, весьма значительный. Поскольку вольт-амперная характеристика является нелинейной, при превышении порогового значения напряжения ток через светодиод начинает быстро расти, поэтому при работе светодиода в осветительном приборе требуется ограничение и стабилизация тока. Таким образом, драйвер для светодиода должен обеспечивать на выходе пониженное напряжение и стабилизацию тока.

С учетом того, что светодиодный светильник представляет собой последовательно-параллельное включение светодиодов, а также с учетом требования универсальности, т.е. адаптации к мощности осветительного прибора, сформулированы следующие основные технические требования к светодиодному драйверу:

- напряжение питания – от 185 до 245 В;
- выходная мощность – от 100 до 200 Вт;
- выходной ток – 1 А;
- выходное напряжение от 100 до 200 В;
- коэффициент пульсаций выходного напряжения – не более 2%;
- КПД – не менее 80%;
- коэффициент мощности – не менее 0,95;
- точность стабилизации тока – $\pm 2\%$.

С учетом разработки драйвера для осветительных приборов промышленного и бытового назначения и использования в помещениях и на открытом воздухе рабочий диапазон температур должен составлять от -40 до $+50$ °С.

Существуют различные способы выполнения данных требований. Требования по КПД обеспечиваются выбором эффективного принципа построения источника питания. Погасить напряжение без тепловыделения позволяет реактивное сопротивление. Функцию балласта может выполнять конденсатор, включенный последовательно с цепочкой светодиодов. Недостатком данной схемы является то, что при изменении напряжения в сети будет изменяться яркость светодиодов. Использование линейного стабилизатора неэффективно в связи с их большими потерями при регулировании больших токов и низким КПД. Наиболее рациональным способом питания светодиодов является импульсный стабилизатор, со звеном повышенной частоты. Структура источника электропитания данного типа представлена на рис. 1 [4]. Здесь как основной источник электропитания светодиодов, так и источник собственных нужд являются импульсными, что обеспечивает высокий КПД светодиода и драйвера.

На входе источника питания установлен помехоподавляющий фильтр ППФ, предназначенный для подавления электромагнитных помех со стороны самого источника питания. Входной низкочастотный выпрямитель В1 преобразует напряжение промышленной частоты 50 Гц в постоянное.

Входной фильтр Ф1 служит для сглаживания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя. Далее высокочастотный инвертор И преобразует постоянное выпрямленное напряжение в переменное высокочастотное. Выход инвертора выполнен на основе высокочастотного трансформатора TV, который понижает напряжение инвертора до необходимой величины. Управление инвертором осуществляет система управления СУ, с использованием принципа широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с обратной связью по току. В качестве датчика тока ДТ используется трансформатор тока. Выходной выпрямитель В2 работает на высокой частоте и служит для преобразования переменного напряжения на выходе инвертора в постоянное необходимое для питания светодиодов. Емкостной фильтр Ф2 снижает пульсации выходного напряжения до заданного уровня. Выпрямитель В3 и фильтр Ф3 предназначены для питания системы управления. Требования по электромагнитной совместимости и коэффициенту мощности обеспечиваются использованием корректора коэффициента мощности.

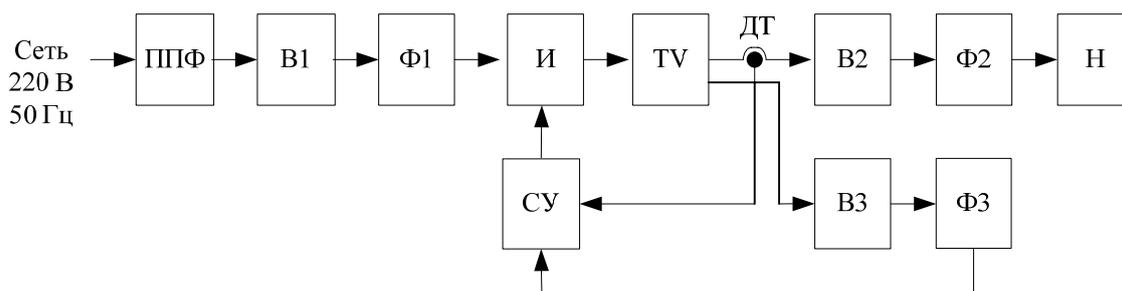


Рис. 1. Структурная схема источника электропитания светодиодного осветительного прибора

Основным узлом драйвера является силовой инвертор, который может быть выполнен по различным схемам. Наилучшими энергетическими характеристиками обладают двухтактные инверторы. Однако такой вариант требует сложной системы управления и большого количества элементов, поэтому его применение в данном случае нецелесообразно. В предлагаемой схеме инвертор выполнен по более простому варианту – однотактного обратногоходового двухключевого инвертора (рис. 2) (в отечественной литературе часто можно встретить название «косой мост»).

Такое схемное решение обладает рядом достоинств, в связи с чем его целесообразно использовать для реализации источника питания светодиодного осветительного прибора. К ним относятся:

- универсальность по мощности, т.к. рабочий диапазон мощностей составляет от 50 до 500 Вт;
- малое число силовых ключей;
- высокий КПД в связи с малым числом транзисторов;
- меньшее напряжение на стоке силовых транзисторов (не превышает напряжения питания инвертора), что позволяет использовать более дешёвые транзисторы и снизить стоимость драйвера;
- защита от короткого замыкания.

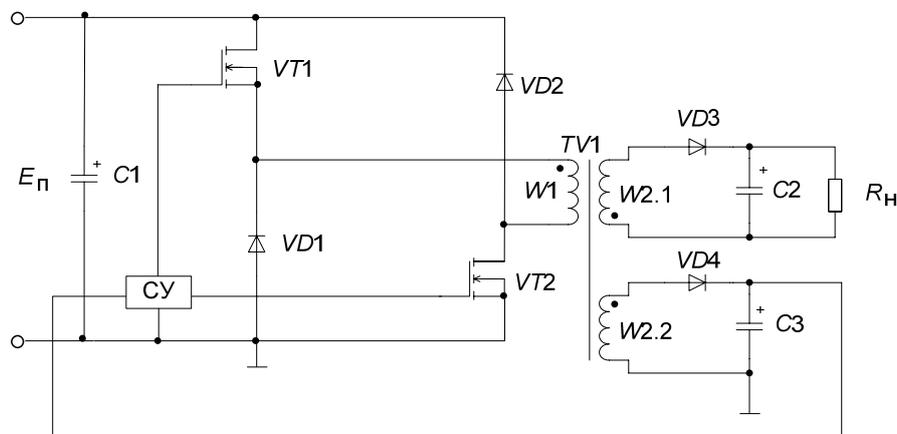


Рис. 2. Однотактный двухключевой инвертор

Исследование драйвера осветительного прибора

Электромагнитные процессы в инверторах данного типа рассмотрены во многих монографиях по транзисторным преобразователям и инверторам. Когда транзисторы VT1, VT2 открыты, то диод

$VD3$ закрыт, а энергия первичного источника запасается в индуктивностях намагничивания и рассеяния трансформатора. При этом магнитопровод трансформатора намагничивается в прямом направлении. Когда транзисторы $VT1, VT2$ закрыты, то диод $VD3$ открыт и накопленная энергия через него поступает в конденсатор фильтра $C2$ и нагрузку R_n . Энергия, запасенная в индуктивностях намагничивания и рассеяния трансформатора, возвращается в источник электропитания E_{II} через открывающиеся диоды $VD1$ и $VD2$, благодаря чему за счет приложения обратного напряжения к обмотке $W1$ происходит размагничивание магнитопровода в обратном направлении.

При разработке источников электропитания актуальными являются вопросы обеспечения надежности и повышения КПД. Для детализации электромагнитных процессов в драйвере и оценки мощности потерь были использованы методы математического моделирования и исследованы способы реализации компьютерных моделей в САПР OrCAD (рис. 3) и системе MATLAB/ Simulink (рис. 4).

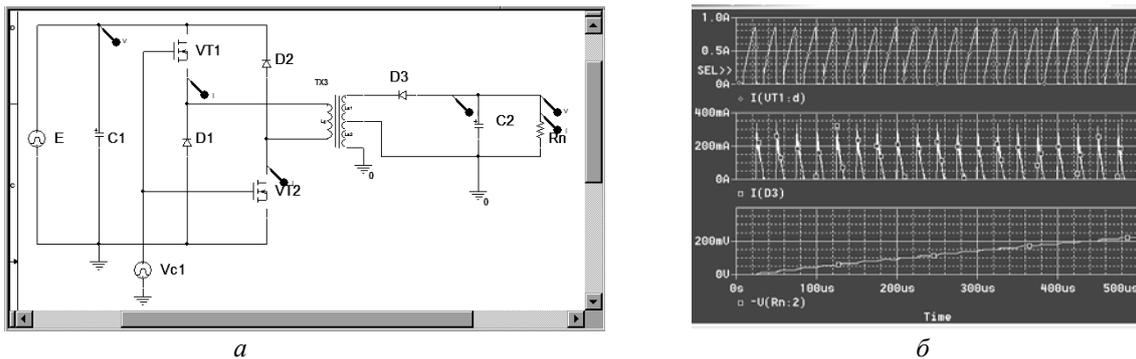


Рис. 3. Модель силовой части светодиодного драйвера в САПР OrCAD: *a* – схема; *б* – временные диаграммы токов транзистора $VT2$, диода $VD3$, выходного напряжения в начале переходного процесса (сверху вниз)

В САПР OrCAD для измерения потерь существуют специальные измерительные приборы, но в MATLAB/ Simulink имеется более широкий спектр моделей функциональных элементов. Это позволяет реализовать смешанное моделирование драйвера с моделированием силовой части инвертора на схемотехническом уровне, а системы управления – на функциональном уровне и тем самым повысить быстродействие вычислительного эксперимента. Наличие в MATLAB/ Simulink средств программирования позволяет по результатам моделирования во временной области построить статические рабочие характеристики драйвера. Поэтому для исследования процессов в светодиодном драйвере выбрана система MATLAB/ Simulink.

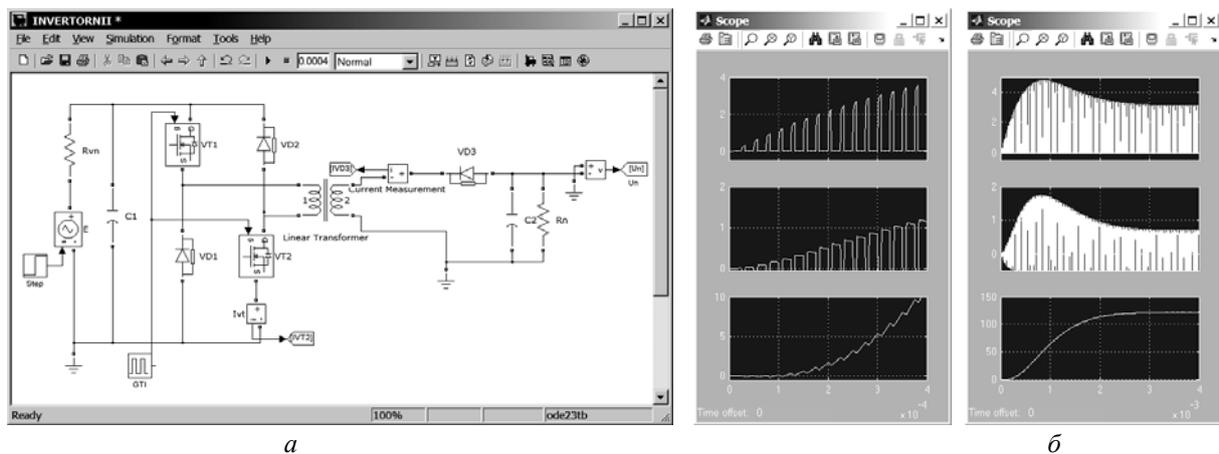


Рис. 4. Модель силовой части светодиодного драйвера в MATLAB/Simulink: *a* – схема; *б* – временные диаграммы токов транзистора $VT2$ и диода $VD3$, выходного напряжения (сверху вниз)

По результатам моделирования с учетом величины тока при переходном процессе и в установившемся режиме для практической реализации выбраны недорогие полевые транзисторы с номи-

нальным током 8 А и допустимой частотой переключения 500 кГц. Поскольку основными источниками потерь являются силовые ключи и магнитные элементы, выбрана невысокая частота работы инвертора 40 кГц. С учетом требований минимизации потерь и стоимости расчет магнитных элементов производился в соответствии с критерием компромиссной геометрии согласно методикам оптимального проектирования, изложенным в работах В.П. Обрусника [5, 6].

Разработка и результаты испытаний драйвера осветительного прибора

В соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1, и принципиальной схемой инвертора, изображенной на рис. 2, изготовлен опытный образец драйвера мощностью 150 Вт (рис. 5) и проведены его испытания. Испытания показали, что драйвер обладает следующими параметрами:

- напряжение питания – от 140 до 245 В;
- выходная мощность – от 115 до 195 Вт;
- выходной ток – 1,05 А;
- выходное напряжение – от 108 до 190 В;
- КПД – 0,86;
- коэффициент мощности – 0,98 (при использовании корректора коэффициента мощности);
- точность стабилизации тока:
 - $\pm 2\%$ при изменении нагрузки в диапазоне 100...180 Ом и
 - $\pm 0,1\%$ при изменении напряжения питания в диапазоне 140...245 В;
- рабочий диапазон температур – $-35...+60$ °С.

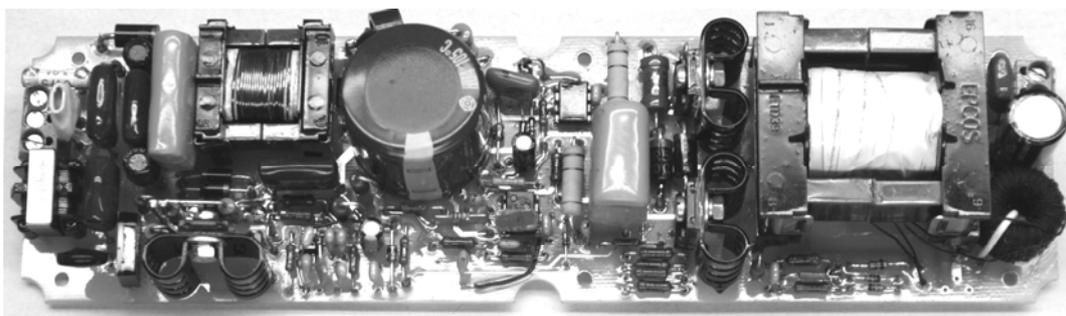


Рис. 5. Светодиодный драйвер осветительного прибора

В опытном образце частота работы инвертора 40 кГц, частота работы корректора коэффициента мощности 100 кГц.

Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментальные данные подтверждают правильность выбранного технического решения.
2. Результаты испытаний драйвера показывают, что он соответствует всем предъявляемым требованиям и обладает запасом мощности, необходимым для стабилизации тока через светодиоды в широком диапазоне температур.
3. Разработанный драйвер может быть использован в составе светильников промышленного и бытового назначения для использования в помещениях и на открытом воздухе, в том числе для уличного освещения.

Литература

1. Гончаров А. К вопросу энергоэффективности и энергосбережения в освещении / А. Гончаров, И. Денисов, И. Козырева и др. / Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 4. – С. 5–9.
2. Анатомия светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lighting.philips.ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/anatomy.wpd> (дата обращения: 12.09.2011).
3. Создание белого цвета с помощью светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lighting.philips.ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/white_led.wpd (дата обращения: 12.09.2011).
4. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 631 с.

5. Обрусник В.П. Теория и практика оптимального расчета магнитных элементов. – Томск: ТУСУР, 2008. – 152 с.

6. Обрусник В.П. Теоретические положения оптимизации удельно-экономических показателей магнитных элементов. – Томск: ТУСУР, 2009. – 55 с.

Иванов Александр Валериевич

Мл. научн. сотрудник отдела специальных систем электропитания НИИ АЭМ ТУСУРа

Тел.: (382-2) 55-56-80

Эл. почта: ivanovnii@sibmail.com

Федоров Александр Владимирович

Зав. отделом специальных систем электропитания НИИ АЭМ ТУСУРа

Тел.: (382-2) 55-56-80

Эл. почта: fedorov.06@mail.ru

Зайченко Татьяна Николаевна

Д-р техн. наук, профессор каф. теоретических основ электротехники ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-15

Эл. почта: zntomsk@rambler.ru

Целебровский Игорь Викторович

Канд. техн. наук, зам. директора НИИ АЭМ ТУСУРа

Тел.: (382-2) 55-61-96

Эл. почта: aem@tusur.ru

Ivanov A.V., Fedorov A.V., Zaitchenko T.N., Celebrovskiy I.V.

Research and design of control system elements and blocks for light-emitting diode light source with advanced technical and operational specifications

In the paper there are given the basic requirements to power supply source of LED lighting device, the analysis of possible technical decisions is carried out, the scheme of a power part and the results of driver testing are presented.

Keywords: high bright light-emitting diode, power supply, lighting device, LED driver, simulation.
