Электроэнергетика

УДК 628.9.03:537.533.79

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКЛЮЧЕВОГО ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ ДЛЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СВЕТОДИОДОВ

Гинтинг Рутта,
студент кафедры электропривода и электрооборудования
Энергетического института ТПУ, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30;
консультант по энергетике отдела Высшей школы, Индонезия, 15318, БСД,
Уортел Е6/14. E-mail: rutta_ginting@ymail.com

Иванов Александр Валериевич,
мл. науч. сотр. НИИ автоматики и электромеханики
Томского университета систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ivanovnii@sibmail.com

Семенов Сергей Михайлович,
ст. преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования
Энергетического института ТПУ, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: epeo@enin.tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения затрат электроэнергии на освещение, а именно снижение потерь в источнике питания.

***Цель работы**: формулирование требований к источнику питания для светодиодов. Исследование современного высокоэффективного источника света на основе светодиодных элементов, отвечающего стандартам по техническим и энергетическим показателям: коэффициенту полезного действия, точности стабилизации тока, коэффициенту пульсаций выходного напряжения и коэффициенту мощности.*

***Методы исследования:** Обзор литературных и патентных источников по тематике, сравнительный анализ имеющихся данных, испытание опытного образца и имитационное моделирование в программной среде OrCAD.*

***Результаты:** Предложен вариант двухключевого обратноходового преобразователя для источника питания осветительных установок с гальванической развязкой и составлена его компьютерная модель. Результаты показывают, что данный преобразователь соответствует требованиям по эффективности, коэффициенту мощности, надежности.*

Ключевые слова:
Светодиод, источник питания, источник света, драйвер, двухключевой обратноходовой преобразователь.

Освещение является важным аспектом потребления энергии. В настоящее время его доля составляет 25 % от общего числа вырабатываемой электрической энергии [1]. Естественно, что снижение затрат на ее потребление является одной из важнейших задач. Новые источники света должны быть высокоэффективными, энергосберегающими и экологически чистыми [2]. Наиболее полно соответствует этим показателям источник напряжения на основе светодиодов. Источники света на основе светодиодов заняли лидирующие позиции на рынке для таких применений, как уличное освещение, подсветка ЖК-панелей и пр. [3].

Светодиод (СД, СИД, *LED* англ. *Light-emitting diode*) является низковольтным потребителем постоянного тока. Кроме того, для него требуется ограничение величины прямого тока. Следовательно, для питания светодиода от сети переменного тока необходим специальный источник питания (драйвер) [4].

Светодиодный драйвер представляет собой электронное устройство, которое контролирует мощность одного светодиода или их последовательно соединенных линеек. Также драйверы обеспечивают стабилизацию мощности при изменении параметров нагрузки, например температуры [5].

Как известно, светодиоды представляют собой полупроводниковую структуру со свето-излучающим переходом и используются для работы с низковольтным источником постоянного тока [6]. Это обеспечивает светодиодам легкость адаптации к

различным применениям, большой срок службы и безопасность при использовании [5]. Светодиоды имеют полярность, следовательно, ток может протекать только в одном направлении. Малые величины тока и напряжения приводят к недостаточному световому потоку, с другой стороны, слишком большое напряжение и ток могут повредить полупроводниковую структуру.

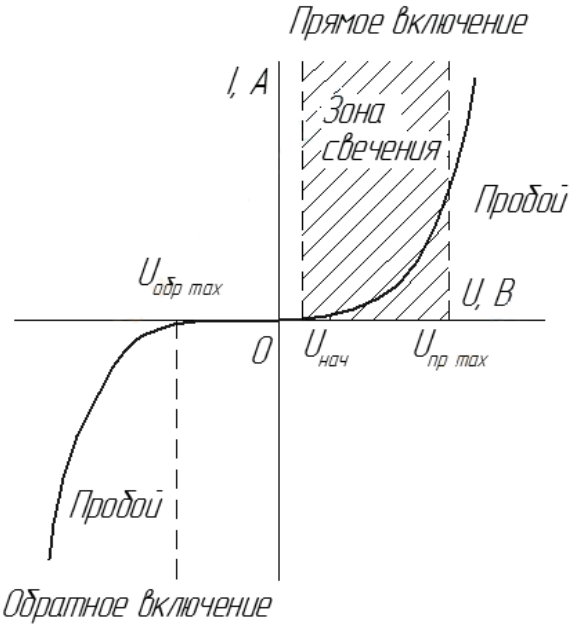


Рис. 1. *Вольт-амперная характеристика светодиода*

Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) светодиода приведёна на рис. 1. Видно, что небольшое изменение прямого напряжения создает непропорционально большое изменение прямого тока. Кроме того, величина прямого падения напряжения, необходимого для достижения номинальной световой отдачи, зависит от многих факторов, таких как конструкция, температура и пр.

При питании светодиодов от регулируемого источника постоянного напряжения в первую очередь должны быть решены проблемы непостоянства светового потока и снижения срока службы. Таким образом, для осветительных приборов обычно рекомендуют использовать источник питания со стабилизацией выходного тока [6].

На рис. 2 изображена типовая ВАХ источника питания для светодиодного светильника. «Область постоянного тока» для каждого конкретного случая может отличаться из-за различных вариантов схем соединения светодиодов [7].

С учетом вышеизложенного, а также из-за особенностей осветительных сетей и нормативов по освещенности можно сформулировать следующие требования к источнику питания для светодиодов промышленного и уличного освещения: напряжение питания – от 185 до 245 В; выходная мощность – от 100 до 200 Вт; выходной ток – 0,35...2 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 – ±2 %; рабочий диапазон температур – от –40 до +50 °С [8].

Светодиодные драйверы в основном бывают двух видов: AC/DC и DC/DC. Первый является наиболее распространенным и используются там, где требуется регулировка яркости. Второй тип применяется в цепях постоянного тока при широком диапазоне входного напряжения.

AC/DC преобразователи электрической энергии можно условно разделить на изолированные и неизолированные топологии, выбор варианта зависит от конкретных требований (габариты, эффективность, коэффициент мощности, регулируемый ток). Также проблема защиты от перенапряжений в переходных процессах для светодиодной нагрузки даже более критична, чем для некоторых других видов нагрузки [9, 10].

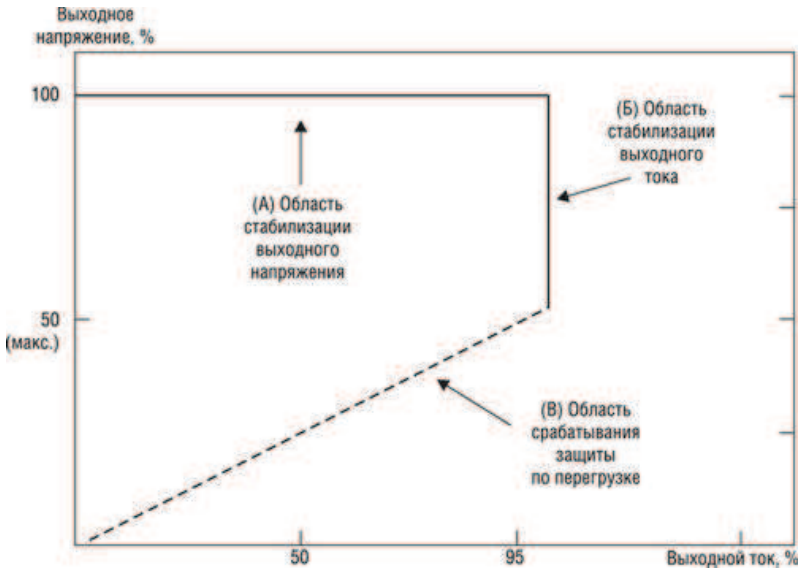


Рис. 2. *Типовая вольт-амперная характеристика источника питания для светодиодов*

В неизолированных топологиях нет трансформатора, их схема проще и состоит из меньшего количества компонентов. Эти источники питания широко применяются для создания маломощных ламп и светильников. Однако в ряде случаев необходимо обеспечить гальваническую развязку светильника от сети для выполнения требований безопасности, ведь, как правило, светодиоды имеют контакт с теплоотводом. Теплоотвод является обязательной частью светильника, так как чрезмерная температура приводит к потере эффективности светодиодов, может вызвать изменение цвета и даже стать причиной возгорания. Также неизолированные схемы более чувствительны к перенапряжениям в сети. В качестве примера неизолированных источников можно привести повышающие (boost) и понижающие (buck) непосредственные преобразователи постоянного тока [11].

В изолированных схемах присутствует трансформатор, который обеспечивает гальваническую развязку между первичной сетью и цепью постоянного тока. Такое решение удовлетворяет требованиям безопасности, но также должно удовлетворять запросам по стоимости, габаритам и потерям, обусловленным индуктивностью рассеяния и более низким использованием окна сердечника. Также важной задачей является коррекция коэффициента мощности (англ. *PFC Power factor correction*). Несмотря на существенные недостатки, применение этой схемы может уменьшить количество, размер и стоимость защитных элементов, необходимых во вторичной цепи трансформатора. В качестве примера изолированных схем можно привести резонансный и обратноходовой преобразователи (англ. *flyback*).

При мощности менее 100 Вт обратноходовой преобразователь является наиболее подходящим решением. При этом емкость накопительного конденсатора на вторичной стороне схемы является небольшой [12].

Преимущество обратноходового преобразователя:

- может применяться с комбинацией любого количества светодиодов, за счет изменения коэффициента трансформации;
- обеспечивает изоляцию и функционирует при большой разности входного и выходного напряжений;
- позволяет использовать ряд промышленно изготовляемых трансформаторов.

Недостатки обратноходового преобразователя:

- существует проблема с электромагнитной совместимостью;
- не оптимальные масса-габаритные показатели;
- требуется дополнительная демпфирующая цепь из-за наличия индуктивности рассеяния трансформатора, что приводит к дополнительным потерям.

Основные требования к источникам питания светодиодов – это высокие надежность и эффективность, коррекция коэффициента мощности и в некоторых случаях, гальваническая развязка. Эти топологии могут быть классифицированы в соответствии с числом ступеней преобразования от одной до трёх.

Одноступенчатые схемы подразумевают низкую стоимость и только одно преобразование энергии. Тем не менее, это также означает, что все задачи должны быть решены за одно преобразование, что обычно приводит к неоптимальному варианту решения. Кроме того, корректор коэффициента мощности без электролитических конденсаторов большой емкости будет иметь высокие пульсации выходного напряжения. Из-за особенностей светодиодов даже незначительные пульсации напряжения приводят к большим пульсациям тока и, следовательно, к мерцанию. Одноступенчатые схемы используются в небольших, чаще всего декоративных светильниках, где необходимы минимальные габариты.

В двухступенчатых источниках первая ступень – это корректор коэффициента мощности, а в качестве второй ступени используется преобразователь, который устраняет низкочастотные пульсации напряжения на выходе корректора коэффициента мощности и регулирует ток через светодиоды.

В трехступенчатой топологии каждый преобразователь оптимизирован только для одной задачи: коррекции коэффициента мощности, гальванической развязки и стабилизации тока в светодиодах. Таким образом, несмотря на три преобразования энергии, эффективность все еще может быть достаточно высокой за счет оптимизации каждой ступени. Однако такой подход имеет смысл только, когда нет ограничений по стоимости и габаритам.

Для питания мощных светильников наиболее распространенными являются двухзвенные варианты источников. В них первая ступень – это, как правило, корректор коэффициента мощности повышающего типа, а вторая ступень – преобразователь, обеспечивающий гальваническую развязку и стабилизацию тока светодиодов [13].

Рассмотрим двухключевой обратноходовой преобразователь в качестве второй ступени источника питания светодиодов, как наиболее подходящий из вышеперечисленных вариантов. Впервые такая схема была описана в материалах фирмы *Philips* [13]. Основные преимущества данной схемы следующие:

- напряжение на ключах не превышает напряжение питания;
- отсутствуют сквозные токи, как и в двухтактных преобразователях;
- простота системы управления;
- нет необходимости в демпфирующих цепях;
- отсутствие индуктивности в выходном фильтре по сравнению с прямым преобразователем;
- высокий показатель надежности.

Источник питания по схеме двухключевого обратноходового преобразователя и его диаграммы токов и напряжений в установившемся режиме приведены на рис. 3.

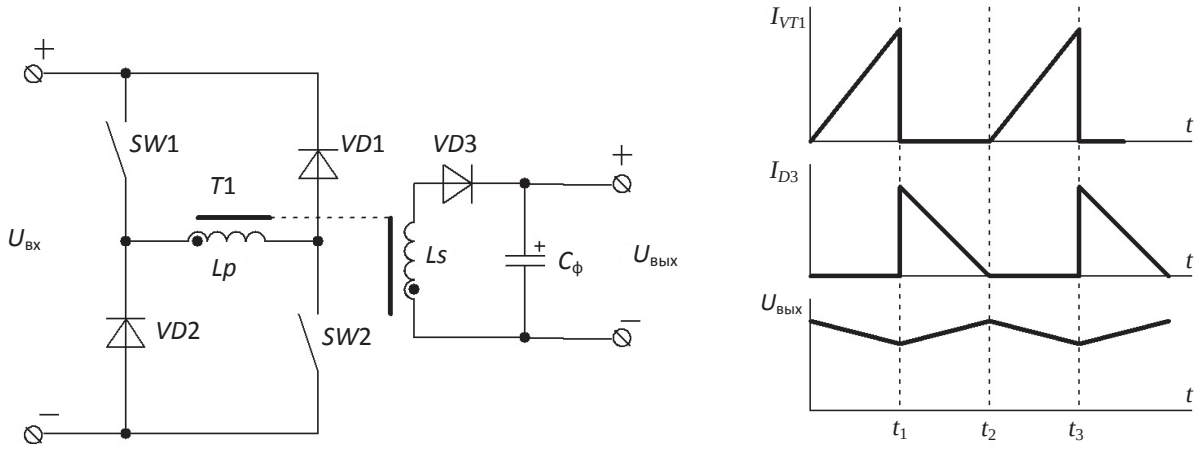
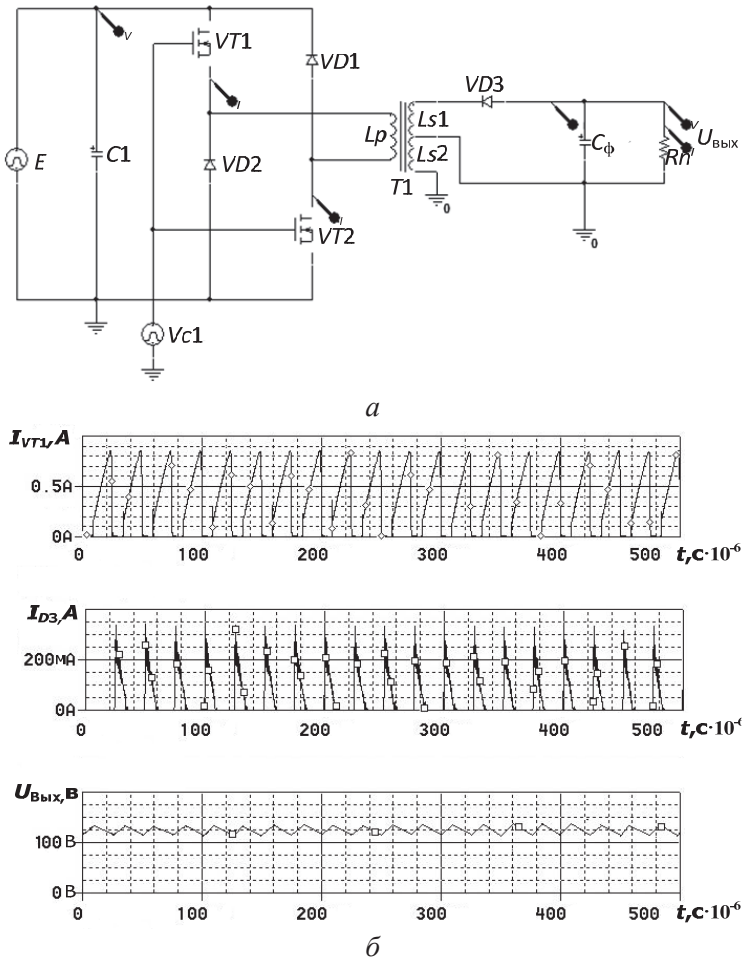


Рис. 3. *Схема двухключевого обратноходового преобразователя и его диаграммы токов и напряжений*

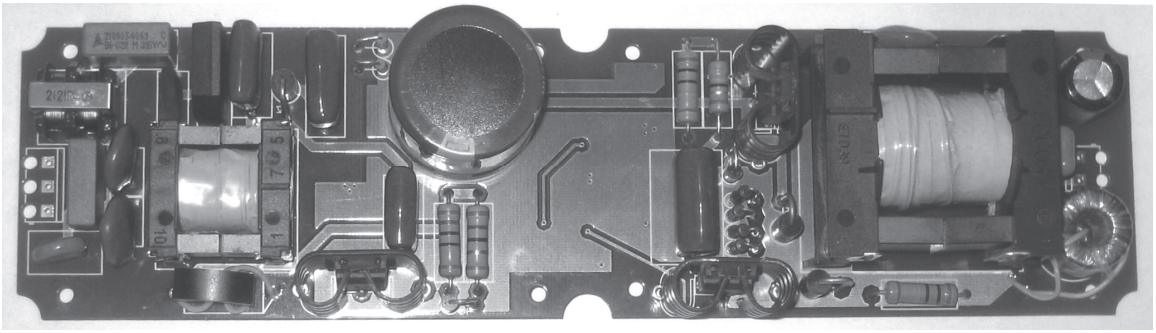


а

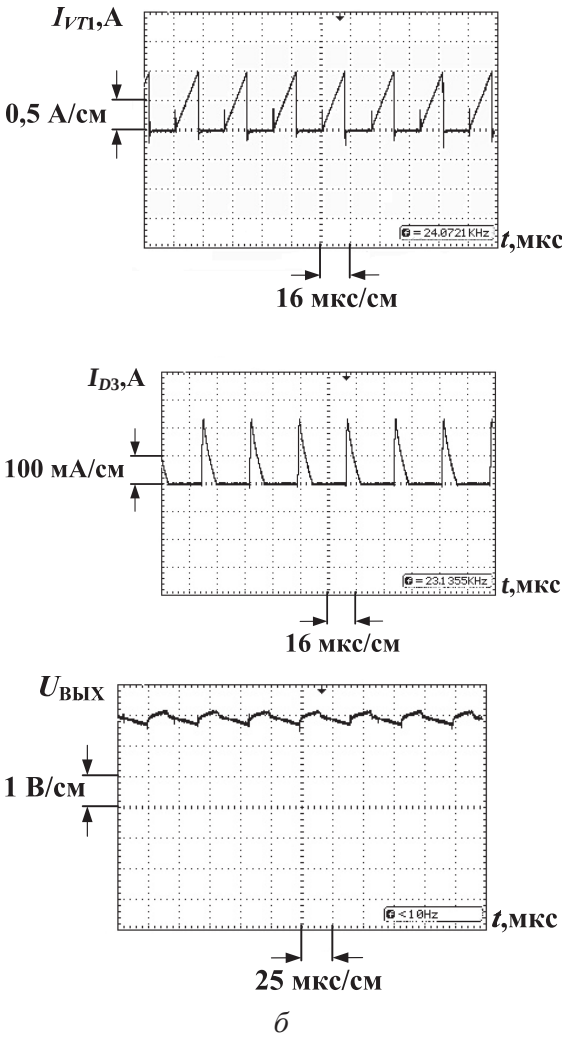
б

Рис. 4. *Модель силовой части светодиодного драйвера в САПР OrCAD: а) схема; б) временные диаграммы токов и напряжений*

Данный тип преобразователя работает как обычный обратноходовой преобразователь, но с небольшими отличиями. В период с $0–t_1$ ключи SW1 и SW2 замкнуты и ток протекает через первичную обмотку W1, диод VD3 в этот период закрыт. Затем в течение периода $t_1–t_2$ ключи SW1 и SW2 закрыты, диод VD3 включен и ток протекает через вторичную обмотку W2. Трансформатор T1 накапливает энергию в течение промежутка $0–t_1$ и отдает её в загрузку в течение периода $t_1–t_2$. Стабильность выходного напряжения поддерживается за счет конденсатора $C_{вых}$. В обычном обратноходовом преобразователе напряжение на ключе превышает напряжение питания, а в данном варианте, если напряжение на первичной обмотке становится больше, чем напряжение питания, диоды VD1 и VD2 открываются и отдают избыточную энергию обратно в первичный источник.



а



б

Рис. 5. *Опытный образец драйвера: а) внешний вид; б) осциллограммы его токов и напряжений*

С помощью имитационного моделирования, в программной среде *OrCAD*, была рассмотрена работа исследуемой схемы (рис. 3). Более подробное описание моделирования этой схемы можно найти в [8]. Результаты моделирования приведены на рис. 4, содержащем схему, диаграммы токов (транзистора VT2, диода VD3) и выходного напряжения $U_{вых}$ в начале переходного процесса (снизу-вверх).

В соответствии с принципиальной схемой преобразователя, изображенной на рис. 3, изготовлен опытный образец драйвера мощностью 150 Вт и массогабаритными показателями: масса – 295 г, длина – 220 мм, ширина – 60 мм, высота 35 мм и проведены результаты экспериментального исследования (рис. 5). На рис. 5, *б* изображены осциллограммы токов и напряжений, полученные опытным путем с помощью цифрового осциллографа (LeCroy Wave Ace). 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 ±2 % при изменении нагрузки в диапазоне 100...180 Ом и ±0,1 % при изменении напряжения питания в диапазоне 140...245 В; рабочий диапазон температур (–35...+60 °С).

В опытном образце частота работы инвертора 24 кГц, частота работы корректора коэффициента мощности 100 кГц [8].

Выводы

Результаты моделирования показали, что теоретические и экспериментальные формы токов и напряжений полностью совпадают, пульсации выходного напряжения не превышают заданной величины (2 %), нежелательные перенапряжения отсутствуют. Таким образом, рассматриваемый двухключевой обратноходовой преобразователь может быть использован в качестве второй ступени в источнике питания для мощных светодиодов, обеспечивая при этом все заданные требования. Разработанный драйвер может быть применен в составе светильников промышленного и бытового назначения в помещениях и на открытом воздухе, в том числе для уличного освещения. Планируется создание по данной схеме гаммы драйверов различной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smart control of road-based LED fixtures for energy saving / A. Lay-Ekuakille, F. D'Aniello, F. Miduri, D. Leonardi, A. Trotta // Proc. IEEE Intell. Data Acquisition Adv. Comput. Syst. – Lecce, 2009. – P. 59–62.
2. Tsao J. Roadmap projects significant LED penetration of lighting market by 2010 // Laser Focus World Magazine. – 2003. – V. 39. – P. 11–14.
3. Evaluation of peripheral visual performance when using incandescent and LED miner cap lamps / J. Sammarco, M. Reyes, J. Bartels, S. Gallagher // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2009. – V. 45. – № 6. – P. 1923–1929.
4. DiLouie C. Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver // LEDs Magazine. URL: http://www.ledsmagazine.com/articles/2004/12/controlling-led-lighting-systems-introducing-the-led-driver.html (дата обращения: 01.11.2013).
5. LED driver. Diodes Incorporated. URL: http://www.diodes.com/content_glossary/led_driver/led_driver_menu.html (дата обращения: 01.11.2013).
6. Cooper J. Driving LED lamps – some simple design guidelines // LEDs Magazine. – 2007. – V. 4. – P. 26–28.
7. LED Power Supply Technical Manual: ISO-9001 Certificated Manufacture. Mean Well Enterprises Co., LTD, 2009.
8. Исследование и разработка элементов и узлов системы управления светодиодным источником света с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками / А.В. Иванов, А.В. Фёдоров, Т.Н. Зайченко, И.В. Целебровский // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 3. – С. 71–77.
9. Patel U. Non-Isolated Driver Protection for LED Lamps. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013. – P. 3–9.
10. LED Lighting Solution. ON Semiconductor Publ., March 2013. 48 p.
11. Patel U. Focus LED Design on Driver Topology, Circuit Protection. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013. – P. 32–36.
12. Liu Y., Yang J. The Topologies of White LED Lamps Power Drivers. Power Electronics Systems and Applications, 2009PESA2009. 3rd International Conference. – Guangzhou, 2009. – P. 1–6.
13. Design of a soft-switching asymmetrical half-bridge converter as second stage of an LED driver for street lighting application / M. Arias, D. Lamar, F. Linera., D. Balocco, A. Diallo, J. Sebastián // IEEE Transactions on Power Electronics. – Gijon, March 2012. – V. 27. – P. 1608–1621.
14. Wolf G. Mains isolating switching-mode power supply // Philips Electronic Application Bulletin. – 1973. – V. 32. – № 1. – P. 18–21.

Поступила 04.11.2013 г.

UDC 628.9.03:537.533.79

RESEARCH OF TWO-SWITCH FLYBACK CONVERTER AS A SECOND STAGE OF A LED DRIVER

Rutta Ginting,
Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30;
Energy division institute, Indonesia, 15318, BSD, Wortel E6/14.
E-mail: rutta_ginting@ymail.com

Aleksandr V. Ivanov,
Research Institute of Electromechanics at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40.
E-mail: ivanovnii@sibmail.com

Sergey M. Semenov,
Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: epeo@enin.tpu.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the need to reduce electricity costs for lighting decreasing power losses in the power supply.

The main aim of the study *is to formulate basic requirements for LED driver; to analyze modern high-efficiency light sources based on LED lamp, to test two switch flyback converter for technical and energy performance: efficiency, accuracy of current regulation, output ripple voltage and power factor, energy.*

Methodology: *Literature review on topics, such as comparative data analysis using prototype testing and computer modeling using OrCad program.*

Results: *the authors have proposed a version of two switch flyback converter for lighting units with galvanic isolation and have constructed its computer model. The results demonstrate good working performance according to standard requirements for green energy device specification.*

Key words:
LED, power source, source of light, driver, two-switch flyback converter.

REFERENCES

1. Lay-Ekuakille A., D'Aniello F., Miduri F., Leonardi D., Trotta A. Smart control of road-based LED fixtures for energy saving. *Proc. IEEE Intell. Data Acquisition Adv. Comput. Syst*. Lecce, 2009, pp. 59–62.
2. Tsao J. Roadmap projects significant LED penetration of lighting market by 2010. *Laser Focus World Magazine*, May 2003, vol. 39, pp. 11–14.
3. Sammarco J., Reyes M., Bartels J., Gallagher S. Evaluation of peripheral visual performance when using incandescent and LED miner cap lamps. *IEEE Trans. Ind. Appl.* Nov. 2009, vol. 45, no. 6, pp. 1923–1929.
4. DiLouie C. Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver. *LEDs Magazine*. Available at: http://www.ledsmagazine.com/articles/2004/12/controlling-led-lighting-systems-introducing-the-led-driver.html (accessed 1 November 2013).
5. LED driver. *Diodes Incorporated*. Available at: http://www.diodes.com/content_glossary/led_driver/led_driver_menu.html (accessed 1 November 2013).
6. Cooper J. Driving LED lamps – some simple design guidelines. *LEDs Magazine*. August 2007, vol. 4, pp. 26–28.
7. LED Power Supply Technical Manual: ISO-9001 Certificated Manufactur. Mean Well Enterprises Co., LTD, 2009.
8. Ivanov A.V., Fedorov A.V., Zaychenko T.N., Tselebrovskiy I.V. Issledovanie i razrabotka elementov i uzlov sistemy upravleniya svetodiodnym istochnikom sveta s uluchshennymi tekhnicheskimi i ekspluatatsionnymi kharakteristikami [Research and development of components and units control of Light-emitting diode light source with the improved technical and operational characteristics]. *Doklady Tomskovo universiteta system upravleniya i radioelektroniki*, 2011, no. 2 (24), P. 3, pp. 71–77.
9. Littelfuse, Inc. Non-Isolated Driver Protection for LED Lamps. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013, pp. 3–9.
10. LED Lighting Solution. ON Semiconductor Publ., March 2013. 48 p.
11. Patel U. Focus LED Design on Driver Topology, Circuit Protection. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013, pp. 32–36.
12. Liu Yu, Yang Jinming. The Topologies of White LED Lamps Power Drivers. *Power Electronics Systems and Applications,2009PESA2009. 3rd International Conference*. Guangzhou, 2009, pp. 1–6.
13. Arias M., Lamar D., Linera F., Balocco D., Diallo A., Sebastián J. Design of a soft-switching asymmetrical half-bridge converter as second stage of an LED driver for street lighting application. *IEEE Transactions on Power*. Gijon, March 2012, vol. 27, pp. 1608–1621.
14. Wolf G. Mains isolating switching-mode power supply. *Philips Electronic Application Bulletin*, 1973, vol. 32, no. 1, pp. 18–21.