

**Копытов С. М., Босхомджеев С. А.**  
**S. M. Kopytov, S. A. Boshomdzheev**

## **ВЫБОР СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МОЩНОГО СТАБИЛИТРОНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МОДУЛЯТОРЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДИММИРУЕМОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

### **CHOICE OF A SUBSTITUTION CIRCUIT OF A HIGH-POWER STABILIZER FOR USE IN A MAINS VOLTAGE MODULATOR OF A DIMMABLE LIGHTING NETWORK**

**Копытов Сергей Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: skopytov@mail.ru.

**Sergey M. Kopytov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: skopytov@mail.ru.

**Босхомджеев Сергей Алексеевич** – магистрант кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: imp\_ist@mail.ru.

**Sergey A. Boshomdzheev** – Master's Degree Student, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: imp\_ist@mail.ru.

**Аннотация.** Одним из преимуществ светодиодного освещения является возможность диммирования. Используются различные интерфейсы для управления диммерами, но все они требуют подведения к осветительному прибору отдельной линии управления. Альтернативой проводным линиям управления диммерами является передача команд управления по сети электроснабжения с использованием технологии Power Line Communication. В разновидности этой технологии информация кодируется количеством полуволн сетевого напряжения, находящихся между маркерами. Для формирования маркеров необходимо уменьшать амплитуду отдельных полуволн примерно на 10 %. Проблемой является получение стабильного уровня маркеров независимо от тока в сети электроснабжения. Необходим узел снижения напряжения полуволны, являющийся аналогом мощного стабилизатора. Приведены и экспериментально исследованы схемы замещения мощного стабилизатора: определены параметры элементов, получены вольт-амперные характеристики схем замещения, сняты осциллограммы работы в сети питания при рабочих токах. Сформулированы выводы о преимуществах и недостатках данных схем.

**Summary.** One of the advantages of LED lighting is the ability to dim. Various interfaces are used to control dimmers, but they all require a separate control line to the lighting fixture. An alternative to wired control lines for dimmers is the transfer of control commands through the power supply network using Power Line Communication technology. In a variation of this technology, the information is coded by the number of half-waves of line voltage located between the markers. To form the markers, the amplitude of the individual half-waves must be reduced by about 10 %. The problem is to obtain a stable marker level irrespective of the current in the power supply network. A half-wave voltage reduction node, which is an analogue of a powerful stabilizer, is necessary. Powerful stabilizer substitution diagrams are given and experimentally investigated: parameters of elements are determined, volt-ampere characteristics of substitution diagrams are obtained, oscillograms of work in power supply network at working currents are taken. Conclusions about advantages and disadvantages of these schemes are formulated.

**Ключевые слова:** диммируемая система освещения, низкочастотная PLC-технология, маркер, амплитудная модуляция полуволн сетевого напряжения, силовой коммутатор, схема замещения мощного стабилизатора.

**Key words:** dimmable lighting system, low-frequency PLC technology, marker, mains voltage half-wave amplitude modulation, power switch, powerful zener diode equivalent circuit.

**Введение.** Основными источниками внутреннего и наружного освещения в настоящее время являются светодиодные осветительные приборы. Они имеют существенные преимущества перед источниками света других видов (лампами накаливания, галогенными, ртутными и газоразрядными лампами). К таким преимуществам можно отнести экономичность, экологичность, повышенный срок службы, надёжность конструкции, морозоустойчивость и устойчивость к перепадам напряжения. Одним из важных преимуществ светодиодных осветительных приборов является возможность экономии электрической энергии за счёт управления световым потоком, который практически линейно зависит от потребляемого тока.

Светодиоды в осветительных приборах соединяют последовательно, поскольку они имеют низкое падение напряжения. Для питания таких приборов используют источники с выходом по току – светодиодные драйверы. Выпускают драйверы не только с фиксированным выходным током, но и с возможностью регулирования выходного тока – диммируемые светодиодные драйверы [1; 2].

Для управления выходом диммируемого драйвера обычно используют цифровые интерфейсы DALI, DMX512, KNX, а также аналоговое напряжение величиной 0...10 В или ШИМ-сигнал амплитудой 10 В и частотой 0,1...3 кГц. Данные способы управления требуют отдельной сигнальной линии. Кроме того, они имеют ограниченную дальность действия, а также большинство из них создаёт высокочастотные помехи. Поэтому актуальна передача команд управления без использования отдельной проводной линии связи. Такие возможности предоставляет технология Power Line Communication (PLC), позволяющая передавать команды управления по самой линии электроснабжения [3–6].

**Использование модифицированной низкочастотной технологии PLC для управления диммируемой осветительной сетью.** В работах [7–9] предложено использовать модифицированную низкочастотную технологию PLC. В ней информация кодируется количеством полуволн сетевого напряжения, расположенных между маркерами. В качестве маркеров используются полуволны сетевого напряжения, уменьшенные по амплитуде примерно на 10 %, что допускается стандартами на параметры сетевого напряжения. Принцип управления светильниками с помощью низкочастотной технологии PLC демонстрирует функциональная схема диммируемой системы освещения с амплитудной модуляцией полуволн сетевого напряжения, изображённая на рис. 1.

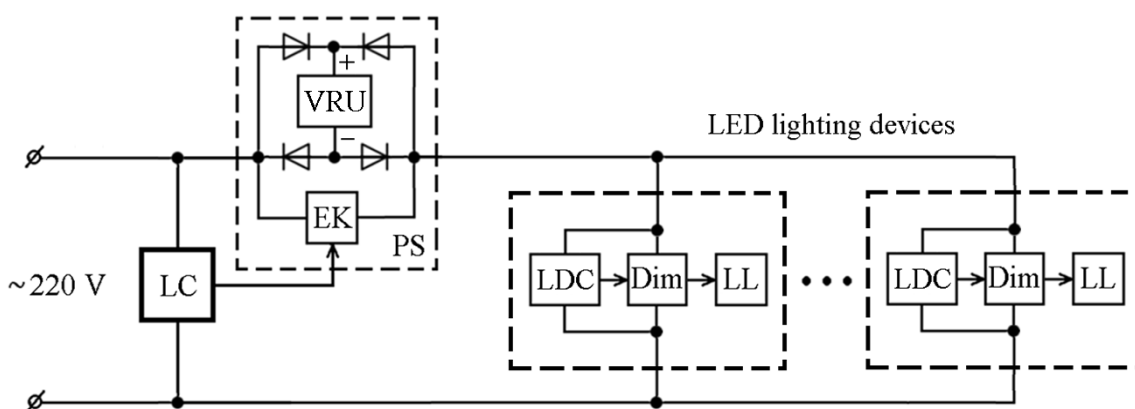


Рис. 1. Функциональная схема диммируемой системы освещения

В разрыв осветительной линии установлен силовой коммутатор (PS), состоящий из электронного ключа (ЕК) и диодного моста. В диагональ диодного моста установлен узел снижения напряжения (VRU) с односторонней проводимостью тока. В обычном режиме освещения электронный ключ открыт сигналом, приходящим от контроллера освещения (LC). Ключ пропускает нормальное сетевое напряжение в линию освещения. К линии подключены светодиодные освети-

тельные приборы, состоящие из контроллера осветительного прибора (LDC), диммера (Dim) и светодиодной лампы (LL).

Начало и конец передачи данных отмечаются маркерами. Для их формирования контроллер освещения не открывает электронный ключ в нужный полупериод сетевого напряжения. В этом случае ток проходит через соответствующую пару диодов в одном направлении через узел снижения напряжения, на котором часть напряжения падает.

Электронный ключ на приведённой схеме должен обладать двусторонней проводимостью. Например, возможна его реализация на симисторе или твердотельном реле. Также возможно использование электронного ключа с односторонней проводимостью, если установить его в диагональ диодного моста параллельно с узлом снижения напряжения. Однако в этом случае придётся примириться с дополнительным падением напряжения на диодах моста.

Преимуществами данного способа управления диммерами являются отсутствие дополнительной линии управления, передача команд управления на большие расстояния, минимальное влияние на форму сетевого напряжения.

Для устойчивого распознавания маркеров требуется, чтобы величина снижения напряжения не зависела от количества осветительных приборов и их мощности, т. е. от тока в линии. Свойством стабильного падения напряжения при разных токах обладают кремниевые стабилитроны, однако их мощность ограничена сравнительно небольшими токами.

Целью работы является выбор и исследование схем замещения мощного стабилитрона с рабочим напряжением 20...30 В и током до 10 А.

**Сравнение схем замещения мощных стабилитронов.** В работах [10; 11] предложен силовой коммутатор на мощных MOSFET-транзисторах, приведённый на рис. 2, а.

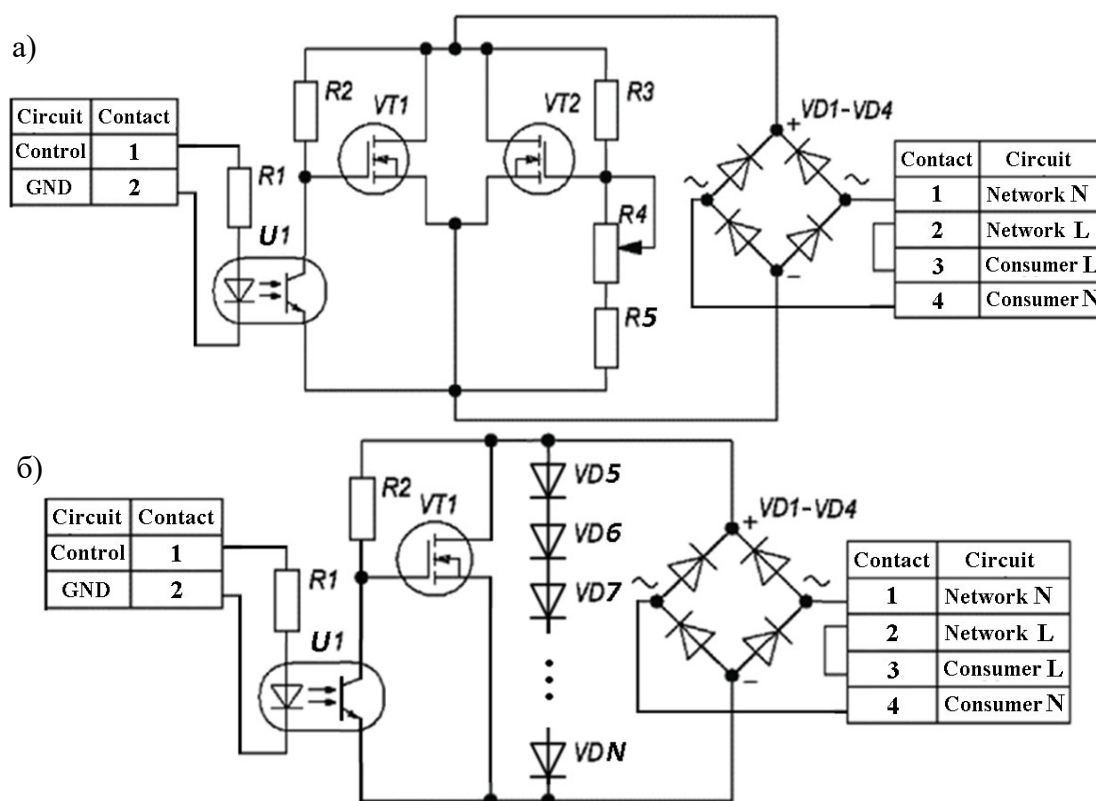


Рис. 2. Принципиальные схемы силовых коммутаторов переменного напряжения:  
 а – силовой коммутатор с гасящим напряжением мощным MOSFET-транзистором;  
 б – силовой коммутатор с гасящей напряжением батареей выпрямительных диодов

Сигналы формирования маркеров поступают через транзисторную оптопару U1 от контроллера освещения. Диодный мост VD1-VD4 предназначен для получения односторонней направленности сетевого тока через MOSFET-транзисторы. Транзистор VT1 работает в режиме ключа, пропуская нормальное сетевое напряжение в линию освещения. В полупериод формирования маркера транзистор VT1 закрыт, а транзистор VT2 пропускает ток и гасит часть сетевого напряжения. Регулировка проводимости канала и падения напряжения на транзисторе VT2 осуществляется резисторами R4 и R5. Однако в зависимости от тока нагрузки это падение будет изменяться, что является существенным недостатком данной схемы.

Для решения этой проблемы в работе [10] предложено использовать последовательное включение мощных выпрямительных диодов в прямом направлении, как показано на рис. 2, б.

Падение напряжения на батарее диодов:

$$U = NU_D,$$

где  $N$  – количество диодов;  $U_D$  – падение напряжения на одном диоде.

Например, в случае использования 24 выпрямительных диодов типа Д245 суммарное падение напряжения составляет порядка 25 В при токе 3 А.

При всей простоте и надёжности такого решения недостатки его также очевидны: большое число дискретных элементов, требующих установку на радиаторы, зависимость падения напряжения от силы протекающего тока и температуры.

В работах [12; 13] авторы рассматривают схему замещения низковольтного стабилизатора с плавной регулировкой напряжения стабилизации и температурной коррекцией его параметров в зависимости от внешних условий. Данная схема приведена на рис. 3, а.

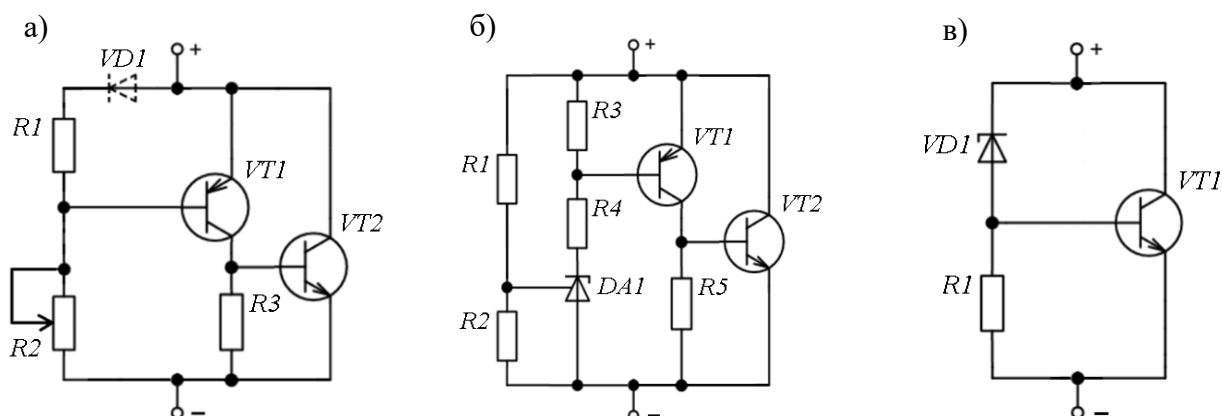


Рис. 3. Принципиальные эквивалентные схемы мощных стабилизаторов:

а – схема с плавной регулировкой напряжения стабилизации;

б – схема с использованием микросхемы низковольтного регулируемого стабилизатора TL431;

в – параллельный стабилизатор напряжения на основе обычного стабилизатора и транзистора

Значение напряжения стабилизации приближённо определяется зависимостью

$$U = 0,6 + \frac{0,35R2}{R1}.$$

Преимуществом схемы является меньшее дифференциальное сопротивление по сравнению с обычными стабилизаторами. В результате схема позволяет получить существенно больший коэффициент стабилизации. К недостаткам схемы относят больший, чем у традиционных стабилизаторов, температурный коэффициент напряжения стабилизации. Для его уменьшения рекомендуют применить термокомпенсирующий германиевый диод VD1 типа Д18.

Хотя авторы позиционируют рассматриваемую схему замещения как низковольтную для диапазона стабилизации напряжения от 1,2 до 7 В, однако она вполне применима и для диапазона стабилизации в десятки вольт. Использование в качестве транзистора VT2 мощного составного транзистора позволяет получить ток силой в несколько ампер.

В работе [14] представлено два варианта сильноточного (до 8 А) параллельного стабилизатора напряжения. Они построены с использованием микросхемы низковольтного регулируемого стабилизатора TL431. В первом варианте стабилизатора могут быть получены напряжения от 1,24 до 1,75 В, а во втором – от 1,75 до 6 В. Схема второго варианта приведена на рис. 3, б, она имеет высокий коэффициент стабилизации и позволяет легко устанавливать нужное напряжение стабилизации. Коррекция значений используемых резисторов позволила применить данную схему для стабилизации более высоких напряжений.

Недостатком схемы является сравнительно большое количество элементов, вследствие чего уменьшается её надёжность. Альтернативным вариантом является параллельный стабилизатор напряжения на основе обычного стабилизатора и транзистора, схема которого приведена на рис. 3, в.

Значение напряжения стабилизации определяется зависимостью

$$U = U_{ST} + U_{BE},$$

где  $U_{ST}$  – напряжение стабилизации используемого стабилизатора;  $U_{BE}$  – падение напряжения между базой и эмиттером транзистора.

Необходимое напряжение стабилизации можно получить путём последовательного соединения стабилизаторов.

**Результаты экспериментальных исследований.** Для оценки пригодности представленных схем замещения к использованию в качестве узла снижения напряжения в программе Multisim выполнено моделирование и определены параметры элементов. Затем на испытательном стенде с источником питания постоянного тока и нагрузкой в виде проволочного реостата опытным путём получены вольт-амперные характеристики (см. рис. 4).

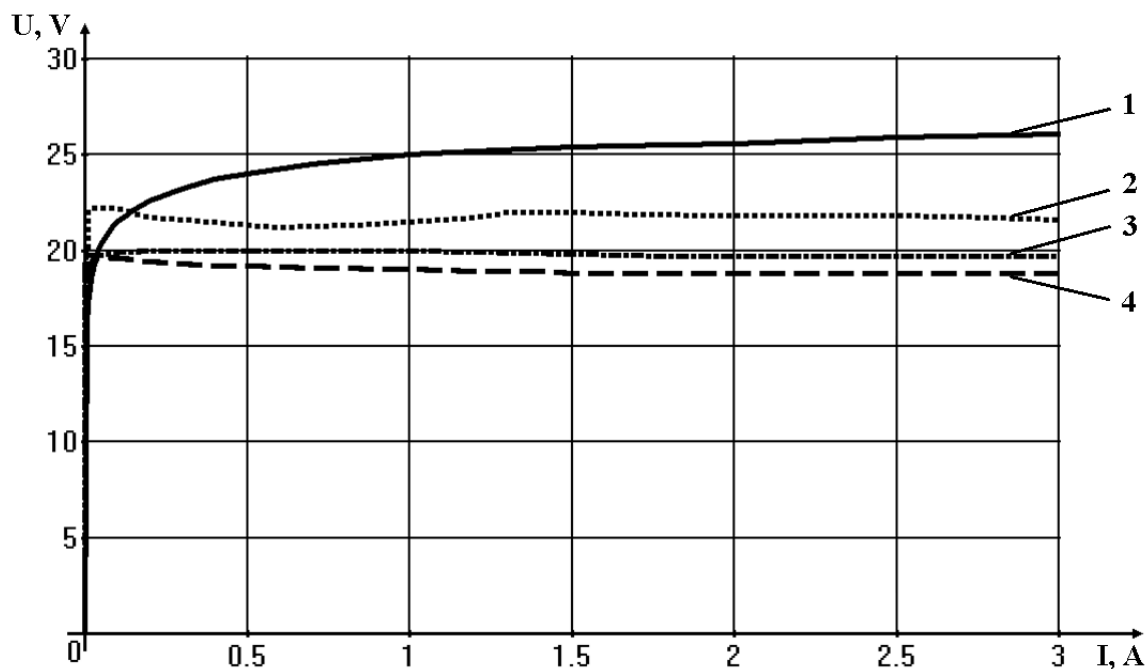


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики эквивалентных схем мощного стабилизатора

На рис. 4 график 1 соответствует характеристике батареи из 24 выпрямительных диодов Д245 с максимальным током 10 А.

В следующих трёх схемах замещения в качестве гасящего напряжения и пропускающего основной ток элемента использован один и тот же мощный составной транзистор типа КТ827А, который имеет максимальный ток коллектора 20 А. В то же время номинальное значение максимального напряжения коллектор-эмиттер данного транзистора может быть меньше амплитудного напряжения сети 311 В, поскольку на нём падает не больше 10 % от этого напряжения. Данный транзистор установлен на массивном радиаторе.

График 2 соответствует схеме замещения на рис. 3, а. При этом использованы следующие элементы:  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3,6 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1,1 \text{ кОм}$ , VT1 – составной p-n-p транзистор КТ973А. График 3 характеризует схему, представленную на рис. 3, б. В ней использованы резисторы со следующими параметрами:  $R_1 = 36 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 5,1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 1,1 \text{ кОм}$ , VT1 – составной p-n-p транзистор КТ973А. Последний график 4 соответствует схеме параллельного стабилизатора напряжения с параллельным включением транзистора (см. рис. 3, в). В качестве стабилитрона VD1 использован мощный стабилитрон Д815А с напряжением стабилизации 20 В. Добавочный резистор  $R_1 = 27 \text{ Ом}$ .

Сравнение вольт-амперных характеристик показывает, что наименьший коэффициент стабилизации имеет схема замещения в виде батареи выпрямительных диодов. Кроме того, от неё же следует ожидать наибольшего температурного коэффициента напряжения стабилизации с отрицательным знаком.

Характеристика для схемы замещения на рис. 3, а более стабильна, однако имеет локальные повышения и понижения напряжения стабилизации при разных токах.

Вольт-амперные характеристики схем замещения на рис. 3, б и на рис. 3, в наиболее близки к идеальным характеристикам. Следует указать, что с ростом тока мощный транзистор нагревался, а температура остальных элементов практически не изменялась.

Окончательное тестирование рассмотренных схем замещения проведено в сети переменного тока с напряжением 220 В. Стенд содержал схему замещения мощного стабилитрона и нагрузку в виде проволочного потенциометра. Для сравнения полуволн напряжения, пришедших на нагрузку после гашения части напряжения и без гашения, параллельно схеме замещения был установлен встречный выпрямительный диод. Таким образом, амплитуда положительных полуволн сетевого напряжения уменьшалась, а отрицательных оставалась прежней. Осциллограммы напряжений на нагрузке, полученные при токе около 6,3 А, приведены на рис. 5.

Осциллограмма на рис. 5, а соответствует графику 1 на рис. 4, осциллограмма на рис. 5, б – графику 2, на рис. 5, в – графику 3 и на рис. 5, г – графику 4. Осциллограммы на первый взгляд практически не отличаются друг от друга, что подтверждает работоспособность всех приведённых схем замещения. Более подробное рассмотрение показывает, что вершины модулированных полуволн для последних двух схем замещения немного расширены по сравнению с первыми двумя схемами.

**Заключение.** Для получения маркера при использовании низкочастотной PLC-технологии необходимо уменьшать амплитуду полуволны сетевого напряжения. Величина этого вычета не должна зависеть от силы тока в цепи питания. Таким образом, узел снижения напряжения должен обладать свойствами мощного стабилитрона. Поскольку мощные дискретные стабилитроны на большие токи отсутствуют, приходится использовать схемы замещения.

Рассмотренные схемы замещения мощных стабилитронов имеют различные коэффициенты стабилизации напряжения, температурные коэффициенты напряжения стабилизации, отличаются количеством использованных элементов, линейностью вольт-амперной характеристики на участке стабилизации и возможностью регулировки напряжения стабилизации. Предпочтение следует отдать схемам замещения на основе параллельного стабилизатора напряжения с параллельным включением мощного выходного транзистора. Использование микроэлектронного стабилизатора напряжения TL431 со схемой обвязки позволяет регулировать напряжение стабилизации схемы замещения.

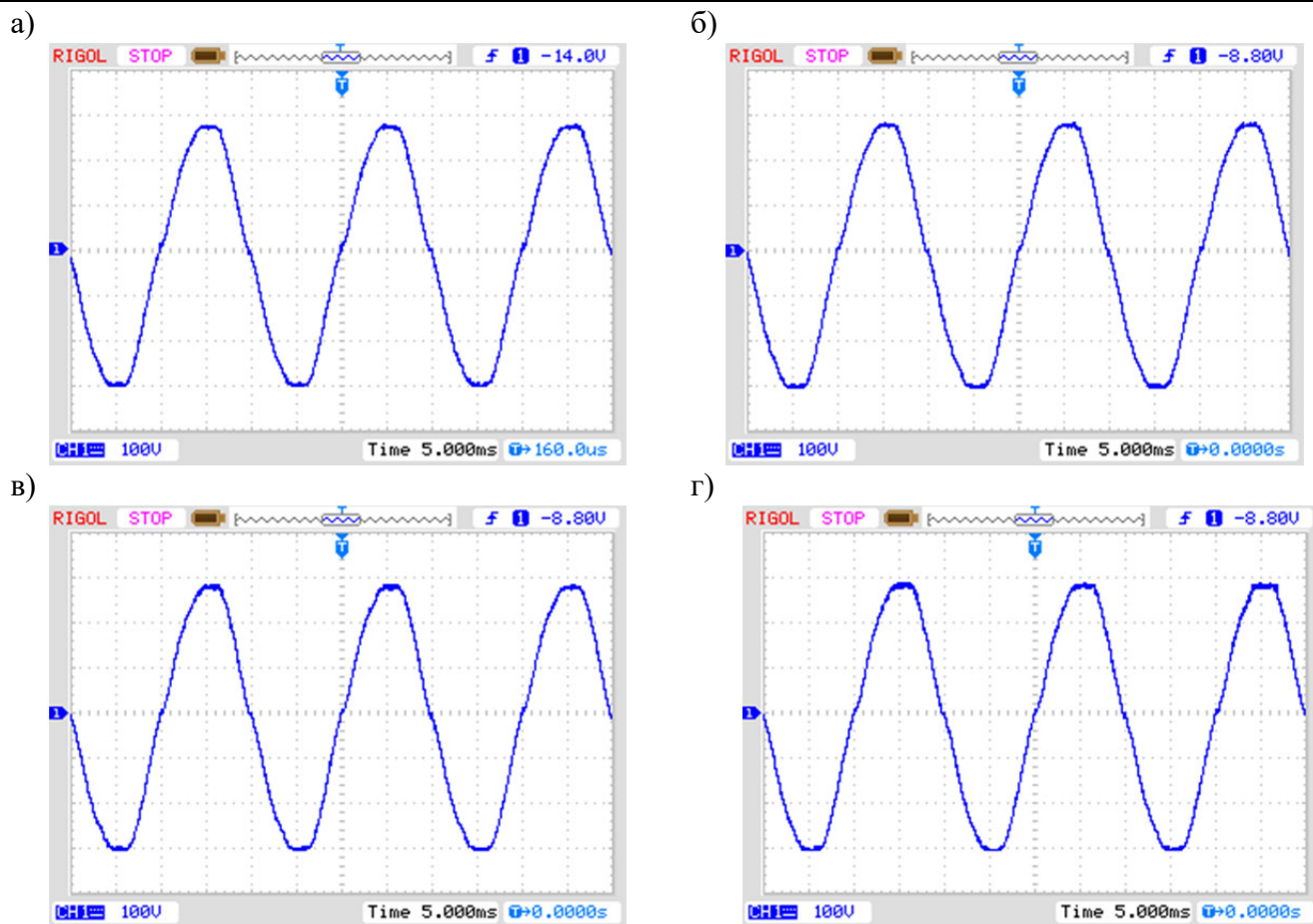


Рис. 5. Осциллограммы напряжений на нагрузке при модуляции положительных полувольт сетевого напряжения: а – гашение напряжения батареями выпрямительных диодов; б – гашение напряжения схемой с плавной регулировкой напряжения стабилизации; в – гашение напряжения схемой с использованием микросхемы низковольтного регулируемого стабилизатора TL431; г – гашение напряжения параллельным стабилизатором напряжения на основе обычного стабилизатора и транзистора

Необходимо заметить, что схемы замещения мощного стабилизатора находят применение также во многих других областях силовой электроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Y., Alonso J. M., Ruan X. A Review of LED Drivers and Related Technologies // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, p. 5754-5765, July 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2677335. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869351>.
2. Коротков, С. М. Источники питания для светодиодного освещения / С. М. Коротков, А. В. Лукин // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 46. – С. 45-49.
3. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC // 2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), IEEE, 2015, p. 1-6. DOI: 10.1109/ISC2.2015.7366195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366195>.
4. Коротченко, Ф. Создание сети передачи данных на основе PLC-технологии / Ф. Коротченко, Н. Наташина // Control Engineering Россия. – 2019. – № 6 (84). – С. 64-68.
5. Никуличев, А. Ю. Система управления уличным освещением с использованием передачи информации по сети электроснабжения / А. Ю. Никуличев, А. А. Сапронов // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – Спец. выпуск. – С. 137-138.

6. Вставская, Е. В. Способ передачи информации по питающей сети и его применение в построении систем автоматизированного управления наружным освещением / Е. В. Вставская, Е. В. Костарев // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 2. – С. 81-84.
7. Патент № 2525854 Российская Федерация, МПК Н 04 В 3/54 (2006.01). Система и способ связи через амплитудную модуляцию линий электропитания: № 2012100298/07; заявлено 14.06.2010; опубликовано 20.08.2014 / Седлак Йозеф; патентообладатель Седлак Йозеф. – 9 с.
8. Kopytov S. M., Ulyanov A. V. Modification of the Dimming Control Method for LED Lighting Using PLC Technology // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, p. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602739. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8602739&isnumber=8602430>.
9. Марущенко, Д. С. Разработка модели управления системой светодиодного освещения посредством PLC-меток с моделированием системы обратной связи / Д. С. Марущенко, А. В. Ульянов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 315-317.
10. Копытов, С. М. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии / С. М. Копытов, А. В. Ульянов, Р. В. Шибек // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 9 (22). – С. 152-161.
11. Копытов, С. М. Контроллер для управления светодиодными осветительными сетями по линии электропитания / С. М. Копытов, А. В. Ульянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – № 1 (15). – С. 52-59.
12. Александров, И. Регулируемый аналог стабилитрона / И. Александров // Радио. – 1993. – № 11. – С. 39.
13. Клишкин, К. А. Схема замещения стабилитрона с возможностью плавной регулировки напряжения стабилизации / К. А. Клишкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 95-99.
14. Robert N. Buono. High-Current, Low-Voltage Shunt Regulator // Electronic Design, February 7, 2000, p. 132-134. URL: <https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21756712/highcurrent-lowvoltage-shunt-regulator>.