

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С ПЕРЕДАЧЕЙ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ ПО ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Целью работы является построение и исследование упрощенной модели светодиодной осветительной линии с управляемыми светильниками для оценки применимости управления освещением для длинных линий. Для передачи команд управления используется низкочастотная PLC-технология, в которой информация кодируется числом полуволн сетевого напряжения, расположенными между маркерами, представляющими собой полуволны, модулированные по амплитуде. Рассмотрены параметры современных источников питания, применяемых в светодиодной технике. Показано, что применяемые источники питания обладают высоким коэффициентом мощности, широким диапазоном входных напряжений, имеют синусоидальную форму потребляемого тока. Качественный источник питания с корректором коэффициента мощности фактически является нагрузкой, в которой ток минимально опережает напряжение, что позволяет рассматривать источник питания как активное сопротивление. Экспериментально исследован диммируемый источник питания светодиодных ламп ИПС50-350TV. Выполнено сравнение осциллограмм входного напряжения и тока, подтверждена синусоидальность формы входного тока, выявлено опережение током напряжения на угол 4,3 градуса. В среде Matlab разработана и промоделирована упрощенная модель системы светодиодного освещения для длинных линий. В качестве входных изменяемых параметров использованы длина линии, сечение питающего провода, параметры источника питания светильника, количество осветительных приборов в линии. Получены и проанализированы временные диаграммы напряжения на дальнем конце линии при передаче команд управления. Показано, что разработанная модель позволяет получить форму напряжения в линии и сформировать требования к приемникам-демодуляторам команд управления, устанавливаемым в светильниках. Полученные результаты моделирования использованы при разработке системы диммируемого светодиодного освещения. Разработаны центральный шкаф управления освещением с реализованными функциями управления по линии электропитания, а также приемники-демодуляторы команд, расположенные в светильниках и задающие уровень диммирования светодиодных ламп.

**Ключевые слова:** PLC-технология, линия светодиодного освещения, маркер, диммируемый источник питания, осциллограммы напряжения и тока, модель системы освещения, Matlab, коэффициент мощности, потери напряжения.

### ВВЕДЕНИЕ

Технология PLC (Power Line Communication) обеспечивает передачу данных по линиям электропитания [1-3]. Различают высокочастотную и низкочастотную PLC-технологии. Высокочастотная PLC-технология имеет ряд существенных недостатков: передающие устройства являются источниками радиопомех; сигналы не передаются через трансформаторные подстанции и сетевые фильтры; дальность действия ограничена несколькими сотнями метров.

Использование синусоиды напряжения питающей электросети для передачи информации подключаемым к сети устройствам имеет определенные преимущества по сравнению с другими видами информационного обмена. К таким преимуществам можно отнести помехозащищенность, использование уже существующих сетей электроснабжения в качестве линий связи, дешевизну реализации приема-передающих устройств.

Для реализации низкочастотной PLC-технологии необходимо проводить модуляцию синусоиды напряжения сети. Так в работах [4] предложено использовать широтную модуляцию полуволн напряжения в начале полупериода аналогично тому, как тиристорный регулятор изменяет подводимую к нагрузке мощность путем задержки включения тиристора на полупериоде переменного напряжения. Отмечено, что данный способ модуляции имеет очевидный недостаток –

уменьшение величины среднего напряжения в модулированной сети. В результате анализа потребителей электроэнергии авторы делают вывод, что в модулированной сети возможна работа только тех потребителей, блоки питания которых построены с использованием выпрямителя и сглаживающего конденсатора, а предложенный способ передачи информации может быть использован при построении систем управления наружным и уличным освещением.

Предложены аналоговый и цифровой способы передачи информации с помощью низкочастотной PLC-технологии [5]. При аналоговом способе информация кодируется широтно-модулированным сетевым сигналом с изменением фазы угла модуляции в пределах  $0...50^\circ$ . При цифровом способе предлагается при кодировании логического нуля фазовую модуляцию не использовать, а при кодировании единицы использовать фазовую модуляцию до  $5...10^\circ$ . Кодирование стартового бита возможно углом модуляции  $20^\circ$ . Очевидно, чем меньше угол модуляции, тем сложнее аппаратно реализовать модулятор и демодулятор сигнала.

Кроме того, использование широтной модуляции полуволн приводит к появлению импульсных помех и высокочастотных гармоник в сети питания, а также может при больших углах модуляции приводить к фликкер-эффекту в осветительной линии. Следовательно, существующие технические решения имеют ограничения, связанные с ухудшением качества электроэнергии, которое регламентировано стандартами на качество и электромагнитную совместимость.

# ОПИСАНИЕ ИСПОЛЪЗУЕМОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМИ СВЕТИЛЬНИКАМИ

Для устранения недостатков существующих способов передачи данных с помощью модуляции синусоиды напряжения сети предложен способ, который устраняет фликкер-эффект осветительной линии и снижает уровень импульсных помех и высокочастотных гармоник в сети питания [6-10]. Суть данного способа заключается в том, что информация кодируется количеством полуволн сетевого напряжения, прошедших между двумя маркерами. Маркеры же представляют собой полуволны сетевого напряжения, уменьшенные по амплитуде примерно на 10%. Маркеры отмечают начало передачи, разделяют адреса светильников и уровень диммирования, а также отмечают конец передачи информации. Во время передачи маркера амплитуда полуволны уменьшается до 280 В, что соответствует уменьшению действующего значения напряжения до 198 В.

Визуальные наблюдения заметного мерцания ламп при передаче команд управления не выявили. Количественная оценка уровня снижения помех и гармоник зависит от параметров модуляции и находится методом спектрального анализа. Поэтому предложенный способ может быть применен для дистанционного управления светодиодными осветительными приборами, однако сфера его использования может быть распространена и на другие области [6-10].

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В среде Matlab разработана имитационная модель воздушной линии со светодиодными осветительными приборами (рис. 1).

Данная модель предназначена для исследования временных диаграмм напряжения в линии при формировании сигналов управления, а также для нахождения распределения напряжения в зависимости от выбранного сечения провода, от количества светильников и от их потребляемой мощности. Нагрузкой линии является  $n$ -е количество модулей светодиодных светильников,

имеющих в своем составе демодуляторы сигналов управления, диммируемые источники питания и сами светодиодные излучатели.

Стандартную синусоиду с напряжением 220 В подают в линию блоки AC Voltage Source1, Pulse Generator1, Ideal Switch. Уменьшенные по амплитуде полуволны (маркеры) формируют блоки AC Voltage Source2, Pulse Generator2, Ideal Switch1. Блоки RL branch1...RL branch6 моделируют участки линии со светильниками, снятие осциллограмм и измерения осуществляют приборы Scope, Voltage Measurement, Current Measurement. Внутренняя структура отдельных участков линии со светильниками представлена в виде R-L узла на рис. 2.

В модели участка линии использованы следующие обозначения:  $R1$  и  $L1$  – активное и индуктивное сопротивление фазного проводника,  $RN2$  и  $LN2$  – активное и индуктивное сопротивление нулевого проводника,  $Rled$  – активное сопротивление светильника.

При разработке математической модели уличного освещения автором в работе [11] принято допущение, что светильники представляют собой нагрузку с линейной зависимостью потребляемой мощности от напряжения, то есть сопротивление нагрузки постоянно. Однако это утверждение справедливо лишь для небольшой части светодиодных светильников.

Рассмотрим адекватность представления модели светильника в виде активного сопротивления. Известно, что схемотехника источников питания, используемых в светодиодных светильниках, непрерывно совершенствуется. Например, в них применяют активные корректоры коэффициента мощности, позволяющие получить коэффициент мощности светодиодного осветительного прибора больше 0,98 при малых нелинейных искажениях тока [12-14]. Кроме того, используются контроллеры управления энергетическими параметрами источников питания и преобразователей без накопительного конденсатора на первичной стороне, которые стремятся сделать форму тока, совпадающей с формой напряжения, то есть практически без сдвига тока по фазе относительно напряжения [15-18].

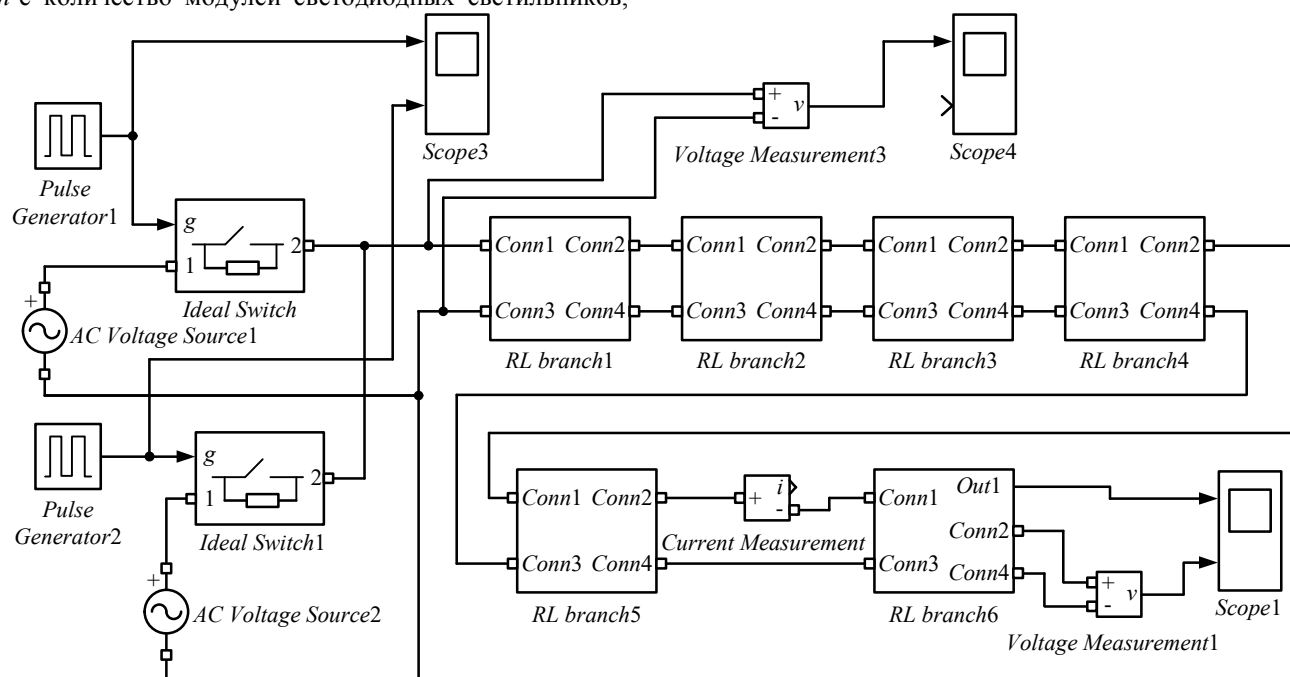


Рис. 1. Имитационная модель воздушной линии со светодиодными осветительными приборами

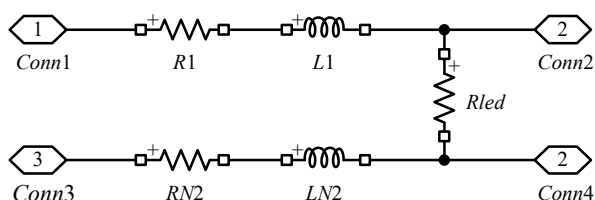


Рис. 2. Имитационная модель одного участка линии в виде R-L узла

Экспериментально исследован светодиодный светильник с диммируемым источником питания типа ИПС50-350ТУ. Входное переменное напряжение источника питания может находиться в диапазоне от 176 до 264 В. Снята зависимость входного тока источника от входного напряжения (рис. 3).

В диапазоне рабочих напряжений зависимость имеет близкий к линейному вид с крутизной около -1,33 мА/В. Из зависимости следует, что при изменении напряжения потребляемая мощность остается примерно на одном уровне порядка 44 Вт, в то же время входное сопротивление увеличивается с ростом напряжения. При напряжении 220 В сопротивление светильника составляет 1100 Ом. Визуальное наблюдение показывает, что яркость лампы не изменяется при изменении напряжения питания в широких пределах, поскольку качественные источники питания имеют драйвер, обеспечивающий стабилизацию тока светодиодов и яркости свечения.

Также исследована форма входного тока светильника. Полученные осциллограммы сетевого напряжения на светильнике и входного тока в цепи светильника приведены на рис. 4.

При проведении эксперимента последовательно с источником питания был соединен низкоомный резистор сопротивлением 6,2 Ом, сопротивление которого незначительно по сравнению с сопротивлением светильника. Падение напряжения на резисторе позволяет визуализировать форму тока через светильник. Из рис. 4, б видно, что ток опережает напряжение примерно на 240 мкс, что в пересчете дает угол 4,3 градуса.

Косинус этого угла составляет 0,997, что позволяет говорить об активном характере сопротивления светильника.

В имитационной модели сделаны следующие допущения. Один участок линии содержит один осветительный прибор, подключенный в конце участка. Вся линия содержит  $N$  таких участков, соединенных последовательно. Количество участков равно 24.

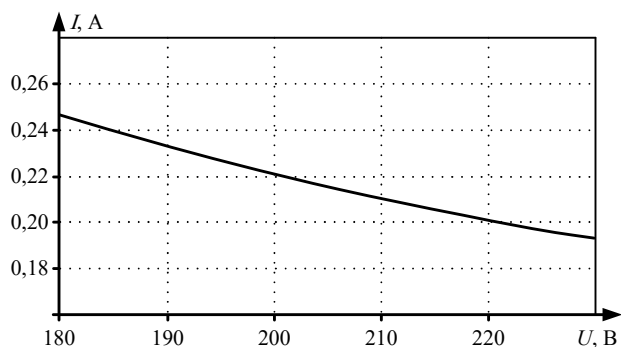


Рис. 3. Зависимость входного тока светильника от входного напряжения

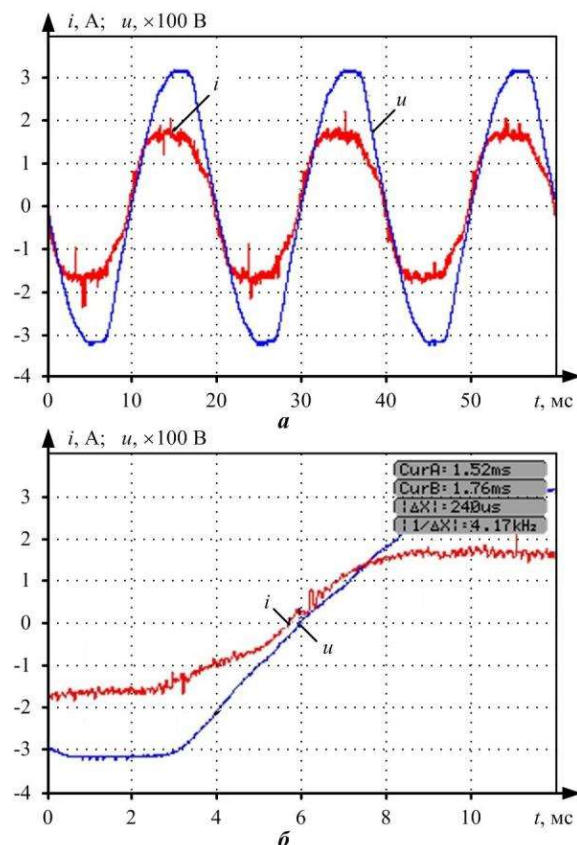


Рис. 4. Осциллограммы напряжения в сети и тока через диммируемый источник питания:  
а – трех периодов сетевого напряжения;  
б – области смены полярности напряжения

Для моделирования осветительной линии использованы следующие параметры: расстояние между светильниками  $l = 32$  м, частота сети  $f = 50$  Гц, действующее значение входного напряжения  $U_n = 220$  В, площадь сечения кабеля  $s = 25$  мм<sup>2</sup>, мощность светильника  $P = 44$  Вт, его коэффициент мощности  $\cos\varphi > 0,98$ , тип кабеля СИП-4 2×25. Удельное электрическое сопротивление кабеля 1,54 Ом/км, удельное индуктивное сопротивление 0,081 Ом/км.

Входное сопротивление светильника зависит от напряжения. Например, для светильника с ВАХ, приведенной на рис. 3, при уменьшении напряжения от 220 до 198 В (на 10 %) сопротивление светильника уменьшается с 1100 до 880 Ом, то есть на 20 %. Для учета данного факта активное сопротивление светильника при номинальном напряжении  $U_n$  определяется по формуле  $R_{led\ n} = U_n^2/P$ , а сопротивление светильника при модулированном напряжении маркера  $U_m = 0,9U_n$  определяется по формуле  $R_{led\ m} = U_m^2/P$ . Активное сопротивление участка провода между соседними светильниками  $R_1 = \rho l/s$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление провода.

Для расчета индуктивности участка провода между соседними светильниками  $L_1$  использовано выражение [19]:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{4l}{d} - 0,75 \right), \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $d$  – диаметр провода.

В качестве альтернативы рассмотренной имитационной модели в физических параметрах предложена масштабируемая имитационная модель распределенной системы освещения для произвольного количества светильников (рис. 5).

В качестве источника питания в данной модели использован источник ИПС50-350ТУ с мощностью 44 Вт [20]. Его входное напряжение может изменяться от 176 до 264 В. Внутренняя структура данной модели в среде Matlab, построенная с использованием коэффициента передачи осветительной линии, приведена на рис. 6.

Коэффициент передачи одного участка линии

$$k(j\omega) = \frac{R_{led}}{\sqrt{(2R_1 + R_{led})^2 + (2 \cdot j\omega L_1)^2}}. \quad (2)$$

Коэффициент передачи всей линии равен произведению коэффициентов передачи отдельных участков.

Из-за падения напряжения на сопротивлении провода на каждом последующем светильнике напряжение уменьшается. Как было отмечено, при снижении питающего напряжения сопротивление источника питания светильника также снижается. Для подтверждения достоверности моделирования разработана программа в среде LabVIEW и выполнен численный расчет линии (рис. 7). В массивах приведены рассчитанные параметры для четырех первых и четырех последних участков линии.

В каждом цикле программы рассчитываются ток в проводе, падение напряжения, сопротивление светильника и коэффициент передачи напряжения текущего

участка. При завершении программы выводятся напряжение в конце линии и суммарное падение напряжения в линии. Результаты моделирования в Matlab и в LabVIEW совпадают.

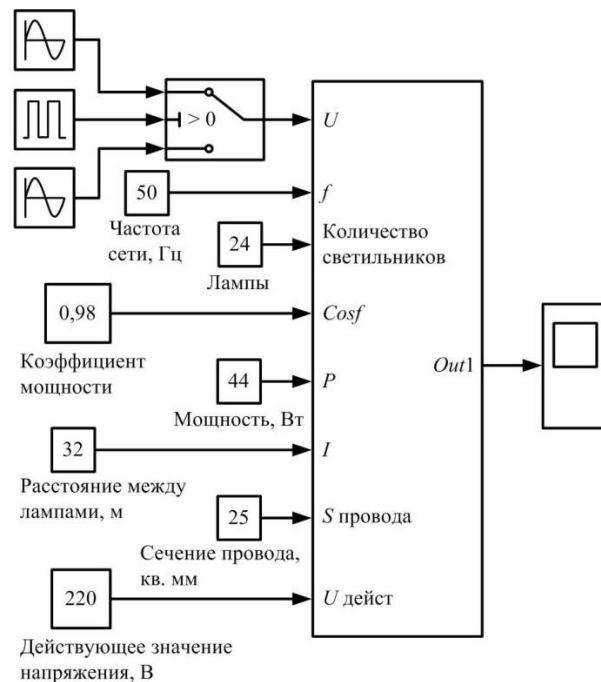


Рис. 5. Имитационная модель распределенной системы освещения для произвольного количества светильников

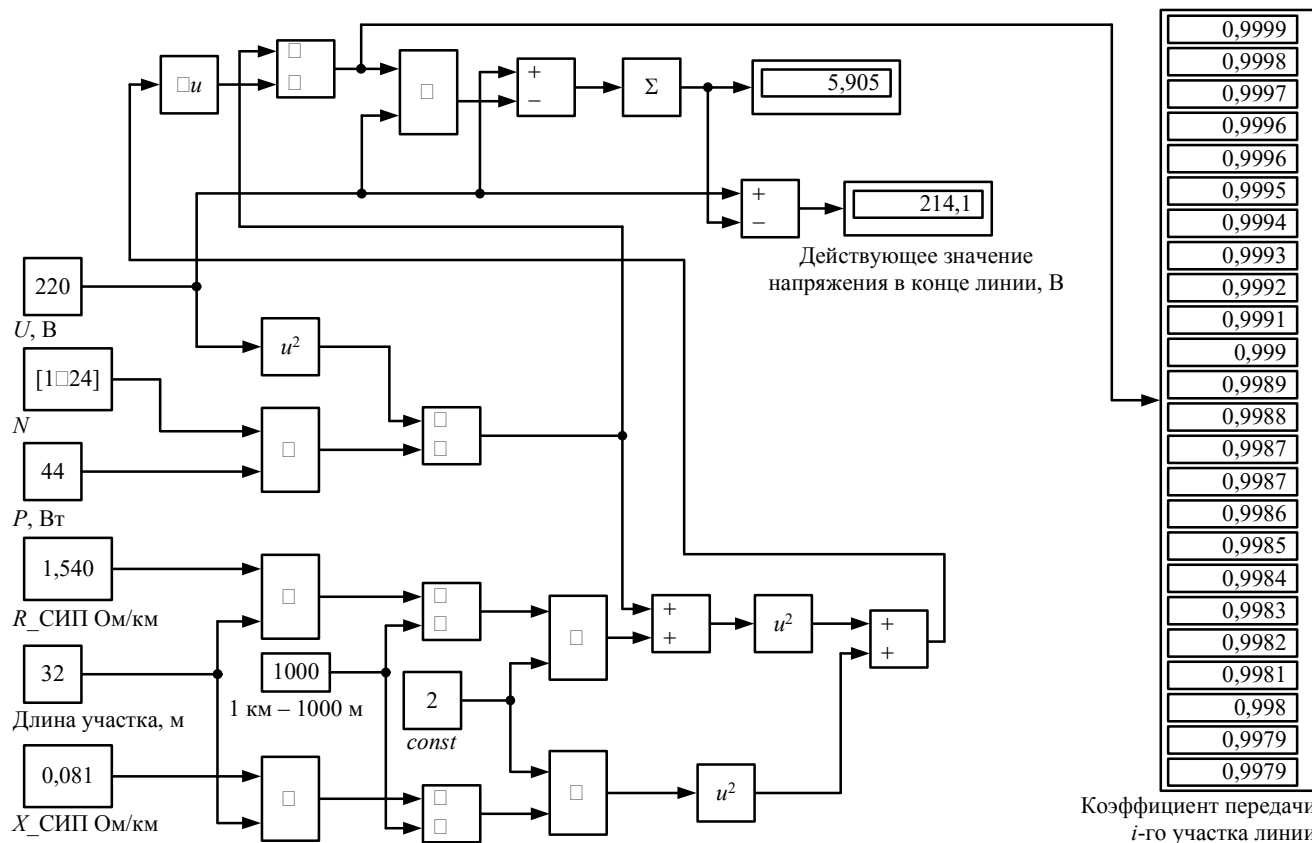


Рис. 6. Внутренняя структура модели с использованием коэффициента передачи линии освещения

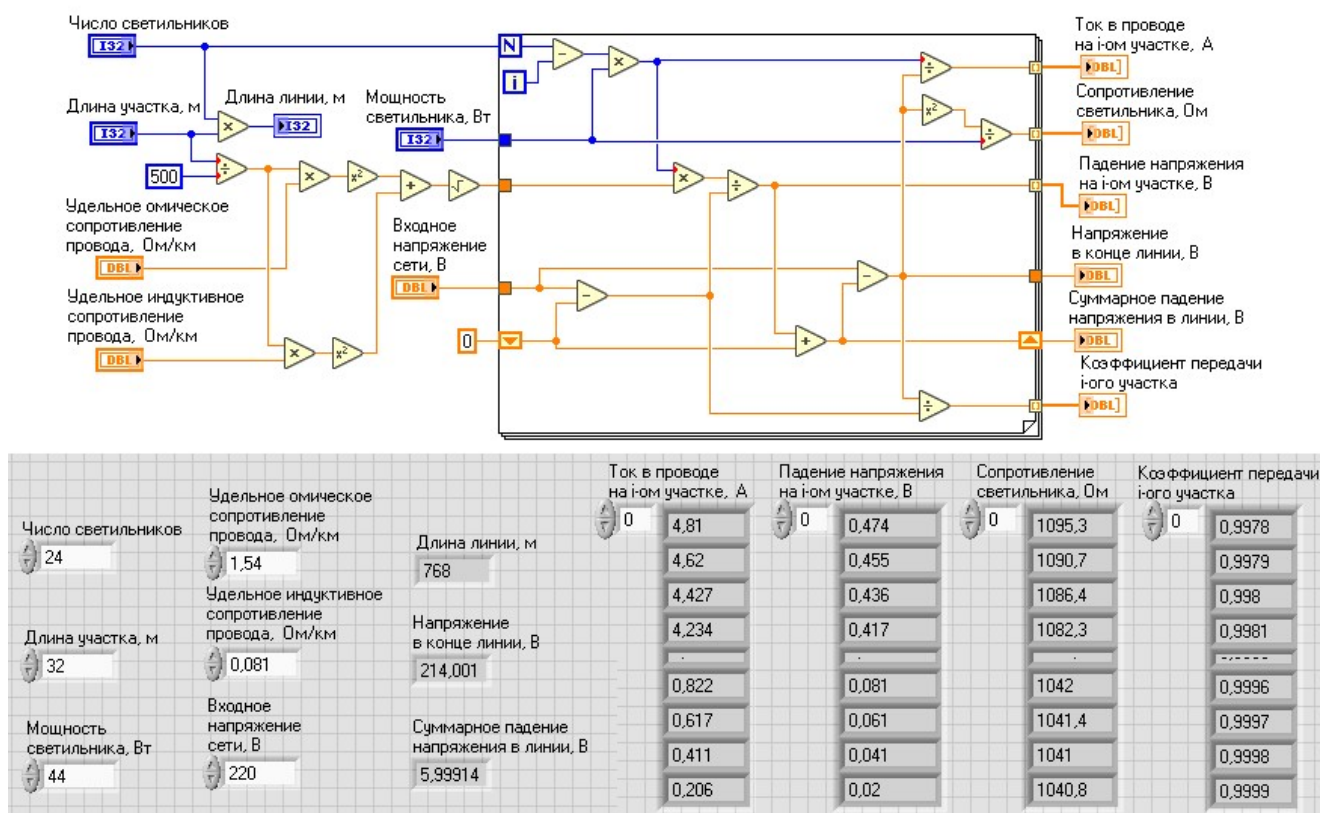


Рис. 7. Блок-диаграмма и результаты работы программы расчета осветительной линии

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Осциллограммы вершин модулированных полу- волн сетевого напряжения, используемых в качестве маркеров, на дальнем конце осветительной линии при- ведены на рис. 8.

Осциллограммы получены в результате использо- вания имитационной модели (см. рис. 5) линий с чис- лом светильников 1, 12 и 24. Для сравнения на рис. 9 приведены осциллограммы вершин полувольт сетевого напряжения без модуляции.

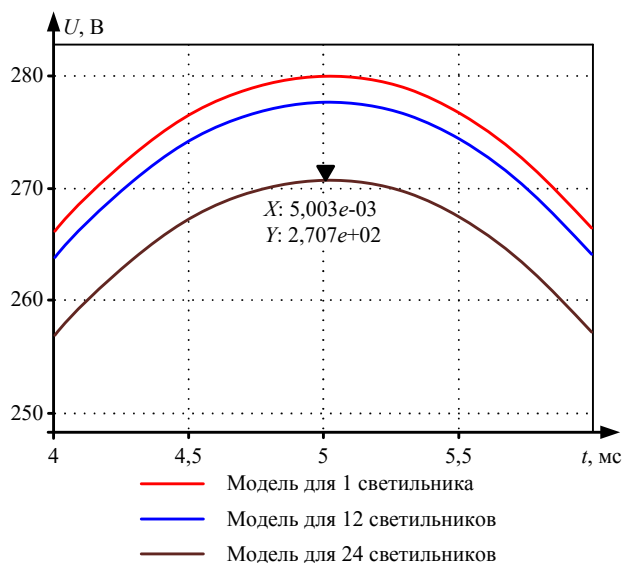


Рис. 8. Осциллограммы вершин полувольт сетевого напряжения, используемых в качестве маркеров

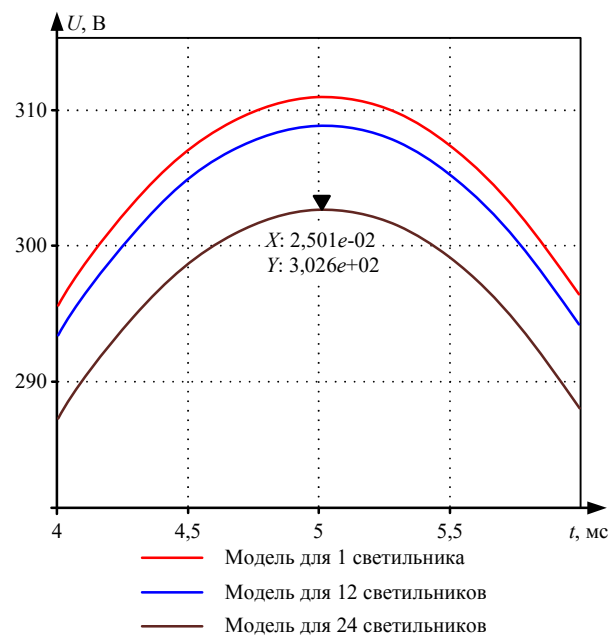


Рис. 9. Осциллограммы вершин полувольт сетевого напряжения без модуляции

Осциллограммы показывают, что с увеличением числа светильников синусоидальный характер напря- жения остается, амплитуда полувольт уменьшается, однако разница амплитуд немодулированных и моду- лированных полувольт сохраняется. Например, для ли- нии с 24 светильниками амплитуда маркера в конце линии снижается примерно до 270,7 В (действующее значение 191,4 В) по сравнению с 280 В (действующее значение 198,0 В) в начале линии, то есть просадка амплитуды напряжения в конце линии составляет око- ло 9,3 В (действующее значение 6,6 В) (см. рис. 8).



Если включено меньшее количество светильников, то просадка напряжения соответственно меньше. Аналогично для линии с 24 светильниками амплитуда полу- волн без модуляции в конце линии просаживается на 8,5 В (действующее значение 6,0 В) (см. **рис. 9**).

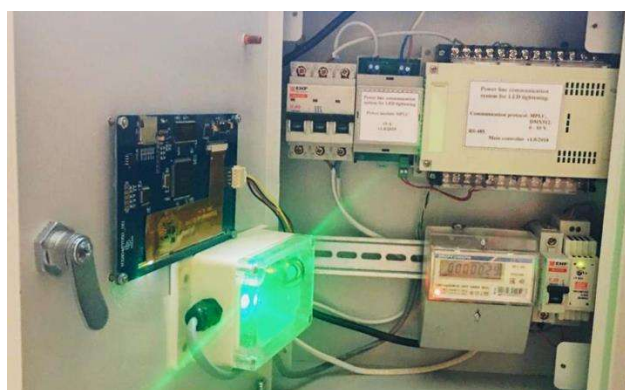
Моделирование показывает, что подбором числа светильников и сечения кабеля питания можно добиться приемлемого уровня падения напряжения в линии из-за наличия омического и индуктивного сопротивления линии. Кроме того, моделирование позволяет оценить дополнительное падение напряжения в линии, возникающее при уменьшении амплитуды напряжения в начале линии в результате модуляции. В случае использования 24 светильников это дополнительное падение напряжения составило 0,6 В для действующего значения. Дополнительное падение обусловлено тем, что ток в линии возрастает при уменьшении входного напряжения, так как для постоянства отбираемой мощности сопротивления светильников уменьшаются.

Приемники-демодуляторы должны надежно выделять маркеры на фоне немодулированных полуво- лн, подсчитывать число немодулированных полуво- лн между маркерами, преобразовывать принятую инфор- мацию в аналоговые или цифровые сигналы управле- ния, используемые в диммерах.

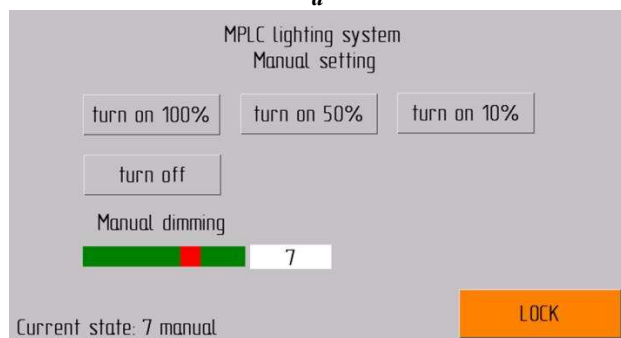
#### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Использование результатов моделирования для практической реализации предложенного способа пере- дачи данных с помощью модуляции основной гар- моники представлено в работах [6-10].

Разработан и собран шкаф управления освещением с реализованными функциями управления по линии электропитания (**рис. 10, а**).



**а**



**б**

**Рис. 10.** Шкаф управления освещением по линии электропитания (**а**) и сенсорная индикаторная панель на лицевой дверке шкафа управления (**б**)

Задание режимов работы светильников осуществ- ляется с помощью сенсорной индикаторной панели, закрепленной на лицевой дверке шкафа управления (**рис. 10, б**). Команды управления принимают прием- ники-демодуляторы команд, расположенные в све- тильниках и взаимодействующие со стандартными диммерами светодиодных ламп.

Проведены испытания по адресному управлению уровнем яркости диммируемых светильников, кото- рые показали работоспособность системы освещения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена имитационная модель воздушной осве- тительной линии с применением низкочастотной PLC- технологии, в которой для адресного управления дим- мируемыми светодиодными светильниками использует- ся амплитудная модуляция полуво- лн-маркеров. Данный способ передачи информации устраняет фликкер- эффект в линии и снижает уровень импульсных помех и высокочастотных гармоник в сети питания.

Экспериментально полученные входные вольт- амперные характеристики диммируемого светильника и осциллограммы сетевого напряжения и входного тока позволяют сделать вывод об активном характере сопротивления светильника. Показано, что при изме- нении входного напряжения потребляемая мощность и яркость свечения лампы практически не изменяются.

В результате моделирования получены осцилло- граммы немодулированных и модулированных полу- волн сетевого напряжения на конце осветительных линий, содержащих различное количество светильни- ков. Осциллограммы позволяют оценить форму напряжения, его просадку, соотношение амплитуд мо- дулированных и немодулированных полуво- лн.

Выбор кабеля с малым погонным сопротивлением обуславливает низкое падение напряжения на нем и, соответственно, малое изменение напряжения между удаленными светильниками. Заданное при модуляции соотношение модулированных и немодулированных полуво- лн сохраняется независимо от числа работаю- щих светильников.

Предложенные модели систем светодиодного осве- щения с передачей команд управления по линии элек- тропитания позволяют проанализировать работу линий с различными наборами параметров их элементов. Результаты моделирования важны при выборе и проекти- ровании элементов системы. В частности, они необхо- димы для разработки схем приемников-демодуляторов светильников, которые должны четко отличать модули- рованные полуво- лны от немодулированных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротченко Ф., Наташина Н. Создание сети передачи данных на основе PLC-технологии // CONTROL ENGI- NEERING РОССИЯ. 2019. № 6 (84). С. 64-68.
2. What is Power Line Communication? // Cypress Semicon- ductor. 2011. URL: <https://www.eetimes.com/what-is-power-line-communication/> (дата обращения: 15.03.2020).
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, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ISC2.2015.7366195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366195> (дата обра- щения: 15.03.2020).
4. Вставская Е.В., Костарев Е.В. Способ передачи инфор-

- мации по питающей сети и его применение в построении систем автоматизированного управления наружным освещением // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 2. С. 81-84.
5. Построение систем передачи информации по проводам питающей сети / Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, Е.В. Костарев, В.И. Константинов // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 23. С. 60-64.
  6. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибко Р.В. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 9 (22). С. 152-161. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-152-161.
  7. Kopytov S.M. and 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, pp. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602739. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8602739&isnumber=8602430> (дата обращения: 15.03.2020).
  8. S.M. Kopytov and A.V. Ulyanov, Development and Research of Marker Isolation Schemes from Low-Frequency PLC Signal // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934699 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934699> (дата обращения: 15.03.2020).
  9. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибко Р.В. Разработка энергоэффективных систем освещения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-2. С. 199-206. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37465> (дата обращения: 15.03.2020).
  10. Копытов С.М., Ульянов А.В. Контроллер для управления светодиодными осветительными сетями по линии электропитания // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. № 1 (15). С. 52-59. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-52-59.
  11. Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4 (41). С. 48-55. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-48-55.
  12. Tenti P., Spiazzi G. Harmonic Limiting Standards and Power Factor Correction Techniques // 6th European Conference on Power Electronics and Applications – EPE '95. URL: <http://www.dei.unipd.it/~pel/Articoli/1995/Epe/tutorial.pdf> (дата обращения: 15.03.2020).
  13. Чаплыгин Е.Е., Калугин Н.Г. Теория мощности в силовой электронике: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Промышленная электроника». М.: МЭИ, 2006. 85 с.
  14. Герман-Галкин С.Г. Школа MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink. Урок 14. Анализ, расчет и исследование корректора коэффициента мощности // Силовая электроника. 2011. № 4 (32). С. 90-96.
  15. Белов Г., Серебрянников А., Павлова А. Структурные динамические модели и частотный метод синтеза двухконтурных систем управления импульсными преобразователями // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 98-106.
  16. I. Castro, A. Vazquez, M. Arias, D.G. Lamar, M.M. Hernandez and J. Sebastian, A Review on Flicker-Free AC-DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids // IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10035-10057, Oct. 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2890716 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8598951> (дата обращения: 15.03.2020).
  17. G.G. Pereira, M.A. Dalla Costa, J.M. Alonso, M.F. De Melo and C.H. Barriquello, LED Driver Based on Input Current Shaper Without Electrolytic Capacitor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4520-4529, June 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815260> (дата обращения: 15.03.2020).
  18. Y. Wang, J.M. Alonso and X. Ruan, A Review of LED Drivers and Related Technologies // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5754-5765, July 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869351> (дата обращения: 15.03.2020).
  19. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
  20. Электронный каталог компании Агрос-Трейд [Электронный ресурс]. URL: <https://www.argos-trade.com/catalog/draivry/ips-50-350tu-ip20-0102> (дата обращения: 15.03.2020).

Поступила в редакцию 24 февраля 2020 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SIMULATION OF LED LIGHTING SYSTEM WITH TRANSMISSION OF CONTROL COMMANDS VIA THE POWER SUPPLY LINE

Sergey M. Kopytov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: [skopytov@mail.ru](mailto:skopytov@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-7967-9460>

Aleksandr V. Ulyanov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: [Ulyanov2@mail.ru](mailto:Ulyanov2@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2548-9132>

Denis S. Marushchenko

Postgraduate student, student of the Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: [D\\_E\\_CHA@mail.ru](mailto:D_E_CHA@mail.ru).

The aim of the work is the construction and study of a simplified model of a LED lighting line with controlled lights to assess the applicability of lighting control for long lines. To transmit control commands, low-frequency PLC technology is used, in which information is encoded by the number of half-waves of the mains voltage located between the markers, which are half-waves modulated in amplitude. The parameters of modern power supplies used in LED technology are considered.

It is shown that the applied power sources have a high power factor, a wide range of input voltages, and have a sinusoidal shape of the current consumption. A high-quality power source with a power factor corrector is actually a load in which the current is minimally ahead of the voltage, which allows us to consider the power source as an active resistance. The dimmable power supply of IPS50-350TU LED lamps was experimentally studied. Oscillograms of the input voltage and current are

compared, the sinusoidal shape of the input current is confirmed, the voltage current is outstripped by an angle of 4.3 degrees. In the Matlab environment, a simplified model of an LED lighting system for long lines was developed and modeled. As input variable parameters, the length of the line, the cross section of the supply wire, the parameters of the power source of the lamp, the number of lighting devices in the line are used. Time diagrams of voltage at the far end of the line were received and analyzed during transmission of control commands. It is shown that the developed model makes it possible to obtain a voltage form in the line and form requirements for the receiver-demodulator control commands installed in the fixtures. The obtained simulation results were used in the development of a dimmable LED lighting system. A central lighting control cabinet has been developed with implemented control functions on the power line, as well as command receivers-demodulators located in the luminaries and setting the dimming level of LED lamps.

**Keywords:** PLC technology, LED lighting line, marker, dimmable power supply, voltage and current waveforms, lighting system model, Matlab, power factor, voltage loss.

# REFERENCES

1. Korotchenko F., Natashina N. Creating a data network based on PLC technology // CONTROL ENGINEERING RUS-SIA. 2019. No 6 (84). P. 64-68. (In Russian).
2. What is Power Line Communication? // Cypress Semiconductor. 2011. URL: <https://www.eetimes.com/what-is-power-line-communication/> (accessed 15 March 2020).
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, pp. 1-6. DOI: 10.1109 / ISC2.2015.7366195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366195> (accessed 15 March 2020).
4. Vstavskaya E.V., Kostarev E.V. The method of transmitting information through the supply network and its use in the construction of automated control systems for outdoor lighting. *Vestnik YuUrGu* [Bulletin of SUSU]. 2011. No. 2. P. 81-84. (In Russian)
5. Vstavskaya E.V., Barbasova T.A., Kostarev E.V., Konstantinov V.I. Construction of information transmission systems over the wires of the supply network // *Vestnik YuUrGu* [Bulletin of SUSU]. 2011. No. 23. P. 60-64. (In Russian)
6. Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Shibeko R.V. Mains voltage switch for controlling LED lighting devices using low-frequency PLC technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2018. No 9(22). P. 152-161. DOI: 10.21285 / 1814-3520-2018-9-152-161. (In Russian)
7. Kopytov S.M. and Ulyanov A.V. Modification of the Dimming Control Method for LED Lighting Using PLC Technological-ogy // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109 / FarEastCon.2018.8602739. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8602739&isnumber=8602430> (accessed 15 March 2020).
8. S.M. Kopytov and A.V. Ulyanov, Development and Research of Marker Isolation Schemes from Low-Frequency PLC Signal // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109 / FarEastCon.2019.8934699 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934699> (accessed 15 March 2020).
9. Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Shibeko R.V. Development of energy-efficient lighting systems. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii* [Modern high technology]. 2019. No 3-2. P. 199-206; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37465> (accessed 15 March 2020). (In Russian)
10. Kopytov S.M., Ulyanov A.V. Controller for controlling LED lighting networks along the power line. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems]. 2019. No 1 (15). P. 52-59. DOI: 10.17122 / 1999-5458-2019-15-1-52-59. (In Russian)
11. Valiullin K.R. Simulation modeling of an electro-technical street lighting system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No. 4(41). P. 48-55. DOI: 10.18503 / 2311-8318-2018-4(41)-48-55. (In Russian)
12. Tenti P., Spiazzi G. Harmonic Limiting Standards and Power Factor Correction Techniques // 6th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE '95. URL: <http://www.dei.unipd.it/~pel/Articoli/1995/Epe/tutorial.pdf> (accessed 15 March 2020).
13. Chaplygin E.E., Kalugin N.G. *Teoriya moshchnosti v silovoy elektronike. Uchebnoe posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po spetsialnosti "Promyshlennaya elektronika"* [Power theory in power electronics. The manual for students studying in the specialty of Industrial Electronics]. Moscow: MPEI, 2006. 85 p. (In Russian)
14. German-Galkin S.G. School MATLAB. Virtual laboratories of power electronics devices in MATLAB-Simulink environment. Lesson 14. Analysis, calculation and research of the power factor corrector. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 2011. No. 4(32). P. 90-96. (In Russian)
15. Belov G., Serebryannikov A., Pavlova A. Structural dynamic models and the frequency method for the synthesis of two-circuit control systems for pulsed converters. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 2008. No. 3. P. 98-106. (In Russian)
16. I. Castro, A. Vazquez, M. Arias, D.G. Lamar, M.M. Hernandez and J. Sebastian. A Review on Flicker-Free AC – DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids // IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10035-10057, Oct. 2019. DOI: 10.1109 / TPEL.2018.2890716 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8598951> (accessed 15 March 2020).
17. G.G. Pereira, M.A. Dalla Costa, J.M. Alonso, M.F. De Melo and C.H. Barriuello, LED Driver Based on Input Current Shaper Without Electrolytic Capacitor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4520-4529, June 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815260> (accessed 15 March 2020).
18. Y. Wang, J.M. Alonso and X. Ruan, A Review of LED Drivers and Related Technologies // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5754-5765, July 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869351> (accessed on 15.03.20).
19. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. *Raschet induktivnostey: Spravochnaya kniga* [Inductance Calculation: Reference Book]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 488 p. (In Russian)
20. The electronic catalog of the company Argos-Trade. URL: <https://www.compel.ru/infosheet/MW/ELG-150-48B> (accessed 15 March 2020). (In Russian)

Копытов С.М., Ульянов А.В., Марущенко Д.С. Моделирование системы светодиодного освещения с передачей команд управления по линии электропитания // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 72-79. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-72-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-72-79)

Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Marushchenko D.S. Simulation of Led Lighting System with Transmission of Control Commands Via the Power Supply Line. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 72-79. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-72-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-72-79)