

- Mezhdunarodnogo agropromyshlennogo energoeffektivnosti predpriyatii kongressa "Perspektivy innovacionnogo zhivotnovodcheskogo napravleniya v razvitiya agropromyshlennogo kompleksa i sel'skih territorij" [Proc. Int. Agro-Ind. Cong. "Perspectives for innovative development of agro-industrial complex and rural territories]. Saint Petersburg: 2014: 182-184 (In Russian)
16. Erk A.F., Razmuk V.A. Avtomatizirovannaya sistema stabilizacii temperatury vozduha v pomeshchenii dlya otkorma telyat s primeneniem chastotnyh regulyatorov [Automated system of air temperature control in the calf-fattening house with the use of frequency regulators]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2015. No. 86:163-169. (In Russian)
17. Sudachenko V.N. Erk A.F. Timofeev E.V. Metody energosberezheniya i povysheniya zhivotnovodcheskogo napravleniya v usloviyakh Severo-Zapada RF [Methods of energy saving and energy efficiency improvement for livestock farms in the North-West of Russia]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. No. 91: 5-14. (In Russian).
18. Sudachenko V.N., Erk A.F., Timofeev E.V., Obosnovanie kriteriya ekonomicheskoi effektivnosti sovместного ispol'zovaniya traditsionnykh i vobnovlyaemykh energoistochnikov [Justification criterion of economic efficiency of joint use of traditional and renewable energy sources]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. No. 92: 35-43. (In Russian)

УДК: 621.321

DOI 10.24411/0131-5226-2019-10148

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В. П. Кузьменко;

С. В. Солёный, канд. техн. наук;

В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук;

О. Я. Соленая, канд. техн. наук;

Е.С. Квас

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время большинство промышленных объектов имеет неудовлетворительное или недостаточное качество электрической энергии. Данный факт можно связать не только с увеличением электрических потерь, переучетом электрической энергии системами и устройствами учета и контроля потребления, но и с нарушением режимов работы оборудования, электрической энергии и даже повреждением электронной техники. Гармоники, увеличивающие пик напряжения, могут вызвать искажения изображения и изменение яркости. Данная статья описывает основные перспективы и проблемы применения светодиодных источников света с точки зрения генерации высокочастотных гармоник тока и напряжения в сеть. Опытным путем получены экспериментальные данные о генерации гармоник тока и напряжения люминесцентным светильником и его светодиодным аналогом. Полученные данные наглядно показывают небольшую, однако имеющую тенденцию к росту, разницу в преобладании высокочастотных гармоник напряжения и значительное

преобладание гармоник тока у светодиодных светильников – на 25% больше чем в люминесцентных аналогах. Получена гармоническая составляющая осветительной нагрузки с использованием светодиодного осветительного оборудования. Для измерения основных показателей гармонических составляющих тока и напряжения использовался трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии. Обозначены проблемы при применении светодиодных энергосберегающих ламп: возникновение импульсных помех и снижение качества электрической энергии; высокая степень вероятности увеличения числа аварийных сбоев и увеличение числа аварийных сбоев и выходов из строя электронного оборудования; ускоренное высыхание конденсаторов и старение электропроводки, вследствие чего возникает необходимость принятия дополнительных мер по установке устройств для компенсации гармоник тока.

**Ключевые слова:** Светодиодный светильник; драйвер светодиодного светильника; генерация гармоник тока и напряжения; снижение качества электроэнергии.

**Для цитирования:** Кузьменко В.П., Солёный С.В., Шишлаков В.Ф., Солёная О.Я., Квас Е.С. Анализ влияния светодиодного освещения на показатели качества электрической сети// *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2(99). С.25-32*

## ANALYSIS OF LED LIGHTING INFLUENCE ON THE QUALITY INDICATORS OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM

V.P. Kuzmenko;

O.Ya. Solenaya, Cand. Sc. (Engineering);

S.V. Soleniy, Cand. Sc. (Engineering);

E.S. Kvas

V.F. Shishlakov, DSc (Engineering);

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, Russia

At present, most industrial facilities have unsatisfactory or insufficient quality of electrical energy. This fact can be associated not only with an increase in electrical losses, redistribution of electrical energy by the systems and devices for consumption metering and controlling, but also with the violation of equipment operation modes, electrical energy and even damage to electronic equipment. Harmonics, which increase the peak voltages, can cause the image distortion and brightness changes. This article describes the main prospects and problems of using LED light sources in terms of generating high-frequency current and voltage harmonics in the network. The data was obtained experimentally on the generation of current and voltage harmonics by a fluorescent lamp and its LED analogue. The data obtained clearly showed a slight difference, which, however, tended to increase, in the predominance of high-frequency voltage harmonics and a significant predominance of current harmonics in LED lamps – 25% more than in luminescent analogues. The harmonic component of the lighting load was obtained using LED lighting equipment. To measure the main indicators of the harmonic components of current and voltage, a three-phase analyser of the parameters of electric networks, quality and quantity of electricity was applied. The article outlines the problems associated with LED energy-saving lamps application: the occurrence of impulse noise and reduction in the quality of electrical energy; a high probability degree of an increase in the number of accidental failures and an increase in the number of emergency failures and breakdowns of electronic equipment; accelerated drying of capacitors and aging of electrical wiring, resulting in the need to additional measures to install devices to compensate for current harmonics.

**Key words:** LED lamp; current and voltage harmonics; reduction of power quality; energy efficiency.

**For citation:** Kuzmenko V.P., Soleniy S.V., Shishlakov V.F., Solenaya O.Ya., Kvas E.S. Analysis of LED lighting influence on the quality indicators of the electric power system. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019. 2(99): 25-32 (In Russian)

## **Введение**

Современные коммунально-бытовые объекты наполнены большим количеством электронной, телекоммуникационной, цифровой и прочей аппаратурой, которая в целом имеет слабую защиту от импульсных помех и перенапряжений. Большинство промышленных объектов имеет неудовлетворительное или недостаточное качество электропитания, в результате чего происходит нарушение режимов работы оборудования, переучет электрической энергии системами устройствами учета и контроля потребления электрической энергии, повреждение электронной техники. Гармоники, увеличивающие пик напряжения, могут вызвать искажения изображения и изменение яркости. Приводят к искажению считываемых показаний электронных узлов учета и систем АСКУЭ (автоматизированная система контроля учета электроэнергии) [1, 2].

При разработке новых проектных решений по строительству и модернизации электроустановок, проектировщики не учитывают высокие показатели нелинейных характеристик драйверов светодиодных светильников, наличие в них гармонических составляющих тока и напряжения, генерации реактивной мощности в сеть, наличие импульсных токов в момент пуска и влияние данных факторов на электромагнитную совместимость.

Известны случаи, когда при включении светодиодных осветительной нагрузки возникали радио и электромагнитные помехи, которые полностью заглушали сигнал теле-радио-приемников. Как правило оказывалось, что установленные блоки питания светодиодных светильников не

удовлетворяли требованиям нормативной технической документации не только к радиопомехам, но и к гармоническим составляющим тока. К сожалению, в настоящее время многие поставщики и начинающие разработчики пренебрегают требованиями к электромагнитной совместимости.

В настоящее время ухудшение качества электроэнергии распределительных сетей больших развитых городов является распространенной проблемой. Многие источники отмечают повышение уровня высших гармоник в электрических сетях мегаполисов. Приведенный в статье анализ, показывает, что уровень третьей и пятой гармоник в некоторых случаях превышает 20%. [3,4]

В последнее время многие авторы отмечают закономерность массового появления высших гармонических составляющих в распределительных сетях районов с большим количеством светодиодных источников света, используемых для освещения улиц и подсветки фасадов зданий. Для современного баланса нагрузок электрических сетей, на нужды освещения приходится 10%-22% выделенной потребляемой мощности [5]. При переходе на новые энергосберегающие технологии освещения это может привести к значительному ухудшению качества электроэнергии и электромагнитной совместимости, а также к сбоям в работе электрооборудования.

Кроме того, в настоящее время участились случаи, когда производители светодиодных источников света и устройств их запуска, управления, стабилизации питания, с целью значительного

удешевления продукции, использует некачественные электронные компоненты. Об расширении данной проблемы можно судить по увеличению количества жалоб, поступающих дистрибьюторам как от простых потребителей световой продукции (например бытовые светодиодные лампочки, которые в настоящее время активно заменяют лампы накаливания) так и профессиональных электромонтажников и поставщиков услуг, связанных с установкой, заменой и обслуживанием светового оборудования.

Описанные выше проблемы формируют цель данного исследования, которая состоит в том, чтобы определить насколько действительно эффективно массовое использование светодиодного осветительного оборудования с точки зрения экономии денежных средств и энергоэффективности, и какие это может повлечь за собой проблемы.

### **Материалы и методы**

Высшие гармоники генерируются в сеть при наличии любой нелинейной нагрузки. В первую очередь к таким нагрузкам относятся импульсные и бесперебойные источники питания, электронные балласты. Главным недостатком импульсных источников питания является генерация импульсов тока, которые содержат большое количество нечетных гармоник. [6].

Гармонические составляющие токов появляются с однофазной нагрузкой и имеют специфическое результирующее воздействие на трехфазную сеть. В идеальном случае, при сбалансированной пофазной нагрузке гармонически (синусоидальные) токи имеют фазовый сдвиг равный 120 градусам относительно друг друга. В результате чего их сумма в нейтрали равна нулю и падения напряжения на нулевом проводнике не возникает.

Однако в трехфазных цепях нечетные гармоники кратные трем могут совпадать по

фазе в результате чего будет образована нулевая последовательность. Таким образом, гармоническая составляющая суммируется в нулевом проводнике, составляя большую долю в действующем значении фазных токов. В результате чего общий ток в нулевом проводнике может превысить фазный.

Помимо вопросов связанных с качеством электрической энергии, возникает и вопрос, который напрямую касаются экономии денежных ресурсов. Данный вопрос связан с тем, что на российском розничном рынке современные поставляемые светодиодные лампы и светильники не имеют того заявленного ресурса работоспособности. Данное некачественное оборудование, к сожалению, обширно представлено как в простых супермаркетах, так и в специализированных магазинах.

Было отмечено, что при покупке сравнительно недорогого (до 80 руб.) по рыночным меркам розничной торговли светодиодного источника света (светодиодная лампочка, аналог лампы накаливания) простая светодиодная лампочка отработывает менее 1000 часов и менее 500 циклов включения, данный факт также был проверен натурными испытаниями, для данных испытаний была построена программа циклов включения/выключения лампы на базе микроконтроллера Arduino UNO программирование и подключение микроконтроллера использовалось согласно методике, описанной в [7].

То же касается и светодиодных светильников – некачественный светильник, со стоимостью не намного отличающейся от стоимости источников света надежных и проверенных производителей, в среднем выходит из строя в течение двух месяцев нормального режима работы. Не редки случаи, когда из партии в 100 шт. светодиодных светильников 3-6 шт. выходят из строя при первом же включении. Данные

факты вносят определенные сомнения в вопрос экономической выгоды применения такого оборудования, ведь проведение работ по замене любого источника света также требует экономических и временных затрат.

Нами были проведены исследования наличия высших гармоник тока и напряжения в светильниках типа PPO 1200/L 40W 4000K IP20 фирмы Jazzway мощностью 40 Вт и их люминесцентных аналогов ЛПО 2x36 Вт. Были получены графики n-3,5,7,9 высокочастотной гармонической составляющей в процентах. Для измерения основных показателей гармонических составляющих тока и напряжения использовался трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии С.А 8335 QUALISTAR PLUS фирмы CHAVIN ARNOUX [8]. Данный прибор подключался пофазно на ввод электрического щита, питающего светодиодные светильники, и вел запись изменения параметров электрической сети (изменения частоты, значений тока и напряжения фаз, фликера и пр.) при включении и выключении источников света. Аналогично считывались параметры электрического щита, питающего люминесцентные светильники.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлен график гармонической составляющей напряжения и график гармонической составляющей тока на рисунке 2.

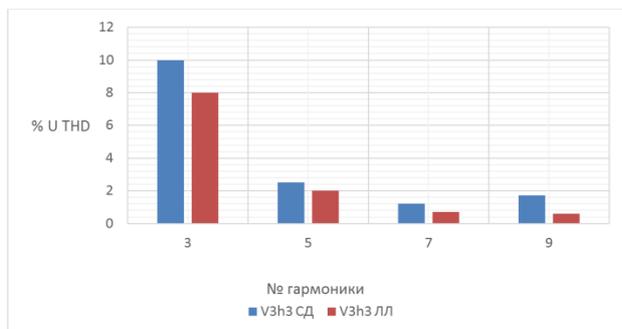


Рис. 1. График гармонической составляющей напряжения в процентах

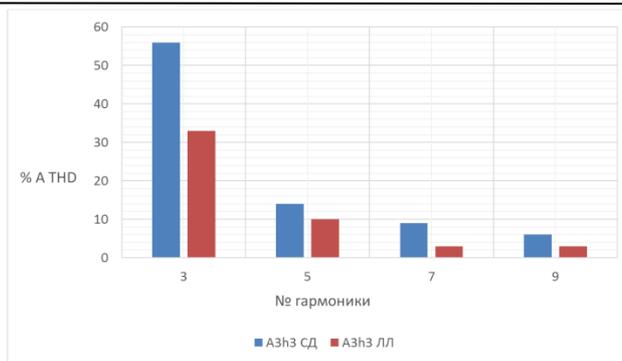


Рис. 2. График гармонической составляющей тока в процентах

Данные рисунки наглядно показывают, небольшую разницу в 2%, однако растущую с порядковым номером гармоники, в преобладании гармоник напряжения, и значительное преобладание гармоник тока у светодиодных светильников (на 25% больше чем в люминесцентных аналогах).

На рисунке 3 показано как в течение дня меняется токовая гармоническая составляющая, одного из административных объектов (школа в Всеволожском районе) в зависимости от использования осветительной нагрузки в течение дня, которая в данном случае сосредоточена на одной фазе (А3h3%). По шкале, отображающей время на графике видно, что гармоническая составляющая появляется при массовом использовании светового оборудования в рабочее время (~7:00 ч.) и идет на спад в конце учебного дня (~15:30 ч.).

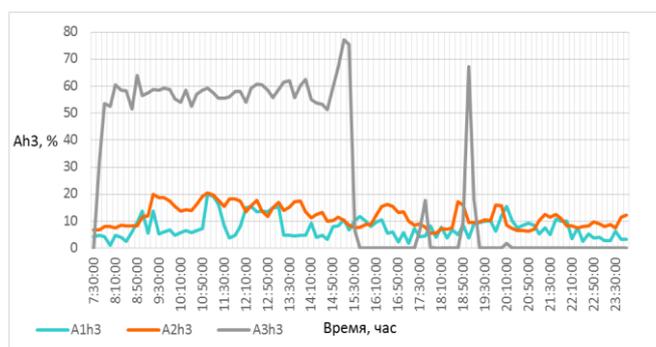


Рис. 3. Полная гармоническая составляющая административного здания (школы), выраженная в % пофазно

ГОСТ 32144-2013 ограничивает величину гармоник напряжения и не ограничивает величину гармоник тока. Однако большие токовых гармоник могут приводить к весьма негативным последствиям, таким как перегрузка распределительных сетей в результате роста действующих значений тока, перегрузка нулевого проводника за счет суммирования высших гармоник, кратным трем, дополнительным потерям в электрических сетях [9, 12].

### Выводы

Несомненно, светодиодные светильники в сравнении со своими предшественниками гораздо энергоэффективнее и лучше по стабилизации потребляемой активной мощности и светового потока при изменении уровня питающего напряжения. Однако они имеют значительный ряд недостатков, одним из которых является суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, который в светодиодных светильниках почти в 1,4 раза выше, а также высокая стоимость, высокая сложность и времязатратность при проведении контрольных испытаний на надежность и долговечность, а также большое количество некачественной продукции, представленной на Российском рынке.

Перспективы активного перехода на светодиодные источники света с

нелинейными характеристиками потребления не могут считаться однозначно положительными без учета электромагнитной совместимости внешней сети и источников вторичного питания, используемых в данных источниках света, а также параметров надежности основных элементов устройства.

Таким образом, массовое применение светодиодных источников света, как промышленное так и бытовое может привести к появлению существенного ухудшения общего гармонического фока электрической сети, и снижению параметров надежности чувствительного оборудования. В силу того, что источники питания потребляют ток импульсным характером, где амплитуда импульсов может достигать значений, в несколько превышающих средний ток потребления, что может привести к искажению сигнала переменного напряжения в сети потребителя, дисбалансу трехфазных линий электропитания, просачиванию значительной части энергетического потенциала обратно в сеть, это значит, что для решения данных проблем необходимо усовершенствование существующих методик испытаний светодиодных источников света, ужесточение требований применения средств для снижения гармоник в схеме драйверов светодиодных светильников.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дребенцов, В. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://ecpol.ru/2012-04-05-13-45-47/2012-04-05-13-46-05/901-energokartina-mira-k-2030-godu.html> (дата обращения: 06.04.2019)
2. Богданов, А. Опыт внедрения светодиодных систем освещения на объектах ОАО «РЖД» // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 2. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.led-e.ru/articles/led-application/2011\\_2\\_56.php](http://www.led-e.ru/articles/led-application/2011_2_56.php) (дата обращения: 06.04.2019)
3. Колмаков В. О., Довгун В. П., Боярская Н. П., Темербаев С. А., Кабак А. Л. Анализ спектрального состава токов и напряжений светодиодных и газоразрядных источников света // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 8 (83). – С. 180–184.

4. Кондратьева Н. П., Терентьев П. В., Филатов Д. А. Сравнительный экспериментальный анализ по электромагнитной совместимости разрядных и светодиодных искусственных источников света для растениеводства // Вестник НГИЭИ. 2018. № 12 (91). С. 39–49.
5. Айзенберг, Ю. Б. Современные проблемы энергоэффективного освещения // Энергосбережение. – 2009. – № 1. – С. 42–48.
6. Климов В. П., Москалев А. Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.tensi.ru/article01.html> (дата обращения: 06.04.2019)
7. Солёный С.В., Солёная О.Я. Безопасная эксплуатация энергетических систем «Умного дома» // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 921–927.
8. Chauvin-Arnoux Company. Официальный сайт <http://qualistar.chauvin-arnoux.com/en>
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. Стандартинформ. 2014. 16 с.
10. Терентьев П. В. Исследование качества и повышение эффективности использования электроэнергии в электротехнических комплексах служебных и жилых зданий: автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2014. 19 с.
11. Шепелев А. О., Киселев Б. Ю., Лысенко В. С. и др. Пути решения проблемы применения светодиодных источников света // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 5-3 (47) — С. 211—213. — URL: <https://research-journal.org/technical/putiresheniya-problemy-primeneniya-svetodiodnyh-istochnikov-sveta/> (дата обращения: 08.04.2019). doi: 10.18454/IRJ.2016.47.292
12. Потапкин Н.Н., Вишневский С.А., Ащрятов А.А. Повышение энергоэффективности осветительных установок общественных помещений // Современные проблемы науки и образования. 2015. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/122-20831> (дата обращения: 06.04.2019)

## REFERENCES

1. Drebenstov, V. Prognoz razvitiya mirovoi energetiki do 2030 goda [Forecast of the world energy development to the year 2030] Available at: <http://ecpol.ru/2012-04-05-13-45-47/2012-04-05-13-46-05/901-energokartina-mira-k-2030-godu.html> (accessed 06.04.2019) (In Russian)
2. Bogdanov, A. Opyt vnedreniya svetodiodnykh sistem osveshcheniya na ob"ektakh OAO "RZhD" [Application experience of LED lighting systems at the facilities of Russian Railways]. Poluprovodnikovaya svetotekhnika. 2011. No 2. Available at: [http://www.led-e.ru/articles/led-application/2011\\_2\\_56.php](http://www.led-e.ru/articles/led-application/2011_2_56.php) (accessed 06.04.2019) (In Russian)
3. Kolmakov V. O., Dovgun V. P., Boyarskaya N. P., Temerbaev S. A., Kabak A. L. Analiz spektral'nogo sostava tokov i napryazhenii svetodiodnykh i gazorazryadnykh istochnikov sveta [Analysis of the spectral composition of currents and voltages of LED and gas-discharge light sources]. Vestnik KrasGAU. 2013. No. 8 (83): 180–184. (In Russian)
4. Kondrateva N. P., Terentev P. V., Filatov D. A. Sravnitel'nyi eksperimental'nyi analiz po elektromagnitnoi sovместимости razryadnykh i svetodiodnykh iskusstvennykh istochnikov sveta dlya rastenievodstva [Comparative

- experimental analysis of the electromagnetic compatibility of discharge and LED artificial light sources for crop production]. Vestnik NGIEI. 2018. No. 12 (91): 39–49. (In Russian)
5. Aizenberg, Yu. B. Sovremennye problemy energoeffektivnogo osveshcheniya [Modern problems of energy efficient lighting]. Energoberezhenie. 2009. No. 1: 42–48. (In Russian)
6. Klimov V. P., Moskalev A. D. Problemy vysshikh garmonik v sovremennykh sistemakh elektropitaniya [Problems of higher harmonics in modern power supply systems] Available at: <http://www.tensi.ru/article01.html> (accessed 06.04.2019) (In Russian)
7. Solenyi C.V., Solenaya O.Ya. Bezopasnaya ekspluatatsiya energeticheskikh sistem "Umnogo doma" [Safe operation of "Smart Home" energy systems]. Izvestiya VUZov. Priborostroenie. 2016. vol. 59, No. 11: 921-927. (In Russian)
8. Chauvin-Arnoux Company. Available at: <http://qualistar.chauvin-arnoux.com/en> (accessed 06.04.2019)
9. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. M.: Standartinform. 2014: 16. (In Russian)
10. Terentev P. V. Issledovanie kachestva i povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii v elektrotekhnicheskikh kompleksakh sluzhebnykh i zhilykh zdaniy: avtoreferat diss. na soisk. uch. step. kand. tekhn. Nauk [Investigation of the quality and increase of the efficiency of the use of electric power in the electrical engineering complexes of office and residential buildings: author's abstract of Cand. Sc. (Engineering) thesis]. Nizhnii Novgorod, 2014: 19. (In Russian)
11. Shepelev A. O., Kiselev B. Yu., Lysenko V. S. i dr. Puti resheniya problemy primeneniya svetodiodnykh istochnikov sveta [ Solutions of a problem of application of LED light sources]. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. 2016. No 5-3 (47): 211-213. Available at: <https://research-journal.org/technical/puti-resheniya-problemy-primeneniya-svetodiodnykh-istochnikov-sveta/> (accessed 08.04.2019). doi: 10.18454/IRJ.2016.47.292 (In Russian)
12. Potapkin N.N., Vishnevskii S.A., Ashryatov A.A. Povyshenie energoeffektivnosti osvetitel'nykh ustanovok obshchestvennykh pomeshchenii [Improving the energy efficiency of lighting installations of public premises]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 2. Available at: <http://www.science-education.ru/122-20831> (accessed 06.04.2019) (In Russian)

УДК: 620.92+620.98

DOI 10.24411/0131-5226-2019-10149

#### АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ ПРОГРАММ В ЗАДАЧАХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А.В. Бобыль<sup>1</sup>, д-р физ-мат. наук;  
В.Г. Малышкин<sup>1</sup>, канд. физ-мат. наук;  
А.Б. Тарасенко<sup>2</sup>;

Е.И.Теруков<sup>3</sup>, д-р техн. наук;  
И.С. Шахрай<sup>3</sup>;  
А.Ф. Эрк, канд. техн. наук