

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ПРОЖЕКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Приведены результаты исследования влияния переходных процессов, происходящих в светодиодных прожекторах на качество электрической энергии. Рассмотрена проблема негативного влияния импульсных источников питания на процессы управления качеством электрической энергии.

Сделаны выводы о целесообразности проведения полевого тестирования осветительного оборудования, для более точного определения эксплуатационных расходов и более реалистичной экономической оценки проектов по реконструкции сетей освещения и переходу на энергоэффективные технологии, а также о необходимом учете всей совокупности технико-экономических параметров энергоэффективных осветительных приборов.

**Ключевые слова:** управление качеством, полевые испытания, оценка качества светодиодного оборудования, анализ качества электрической энергии.

**Введение.** Сегодня осветительные приборы с светодиодными источниками света достигают почти на 70 % большей эффективности потребления электрической энергии, чем любые другие осветительные приборы. Это происходит, во многом, благодаря их способности направленного излучения света [1], что значительно снижает потери, создаваемые отражателями осветительного прибора.

Эффективность светодиодного блока находится в диапазоне 140–150 лм / Вт, но после тепловых, электрических и оптических потерь общая эффективность системы обычно становится на 25–30 % ниже. В настоящее время средняя общая эффективность светильника находится в диапазоне 100–105 лм / Вт [2]. Учитывая все это, осветительный прибор типа HID мощностью 450 Вт может быть заменен на аналогичный с светодиодным источником света и общей мощностью 150 Вт, что по предварительным расчетам позволяет снизить потребление электрической энергии на 67 % [2–4].

Однако полупроводниковый и люминофорный слои светодиодных компонентов, как и их пускорегулирующие устройства (драйверы), могут изготавливаться с использованием различных технологий и материалов. Следовательно, такие свойства, как эффективность, надежность и воздействие на окружающую среду, будут различными для каждого осветительного прибора, однако отличать эти характеристики может быть достаточно затруднительно.

Такая неопределенность затрудняет определение лучшего продукта среди осветительных при-

боров и требует более точных оценок жизненного цикла продукции [5].

Любое усовершенствование в разработке более эффективных технологий освещения может оказать существенное влияние на потребление электрической энергии и, следовательно, воздействие на окружающую среду. Следует также отметить, что уличное освещение составляет существенные расходы в значениях экономического баланса городов. Так, исследование итальянского исследовательского института ENEA (Итальянское национальное агентство новых технологий, энергетики и устойчивого экономического развития) показало, что их средний расход на нужды уличного освещения составляет около 12 % от общего количества расходов [6].

Стимулирование экономического роста, основанного на базе экологических ценностей, становится новой парадигмой для самых развитых городов мира [7]. Ключевым фактором, который следует учитывать в этом смысле, является гарантия хорошего качества электроэнергии в электрических сетях [8].

Стремление снизить потребление энергии в бытовых и административных зданиях приводит к увеличению использования современных систем автоматизации и управления совместно с различными энергоэффективными устройствами. Кроме того, в качестве сетей освещения все чаще предусматриваются энергоэффективные осветительные приборы с светодиодными источниками света. Как правило, для таких устройств требуется более низкое

напряжение, чем напряжение сети, в результате чего в цепи используется большое количество силовых электронных преобразователей, регулирующих условия электропитания устройств данного типа. Работа таких силовых преобразователей отличается наличием сильных нелинейных и импульсных искажений, что может приводить к увеличению потерь, связанных с потоком реактивной мощности и генерацией высших нечетных гармоник.

В рассматриваемом случае и электроустановка здания, и поставщик энергии являются источником гармонических искажений. В разветвленных сетях, с множеством нелинейных потребителей, потоки активной мощности складываются. Наличие нелинейностей может вызывать колебания потока в разные стороны с значительной силой, при этом в зависимости от фазового сдвига может происходить как уменьшение отдельных гармоник, так и их значительное усиление.

**Качество электрической энергии в электроустановках административных и бытовых объектов.** Термин «качество электрической энергии» применяется к широкому набору электромагнитных явлений, происходящих в электрической сети, которые так или иначе оказывают влияние на основные параметры сети: симметричность тока и напряжения, частоту, синусоидальность с постоянной частотой и пр. [9]. Причинами отклонения от номинальных значений данных параметров могут быть как плохая выработка электрической энергии, так и влияние нагрузки различного характера.

Уличные светильники эксплуатируются в тяжелых условиях, а замена таких светильников на более новые, со светодиодными источниками света, означает также и использование более чувствительных электронных преобразователей, чем те, которые использовались до этого.

От осветительных приборов со светодиодными источниками света также ожидается, что они будут работать долго и с низким уровнем отказов [10].

Однако низкое качество электроэнергии увеличивает вероятность периодических отключений, в то время как перерасход затрат на электроэнергию и оборудование может быть результатом более низкой производительности и преждевременной неисправности светильника: «Любые нарушения, проявляющиеся в напряжении, токе и частоте от стандартных значений, рассматриваются как качество электроэнергии и, следовательно, могут являться причиной, повлекшей за собой отказ или сбой в работе электрического / электронного оборудования» [11].

Исследования показывают, что гармоники тока нечетного порядка и пиковые токи являются основными отрицательными эффектами в отношении качества электроэнергии, связанными с отказами электронных устройств, в том числе и светодиодных драйверов [11, 12].

Обострение данной проблемы может также происходить по мере расширения функционала осветительного оборудования и использования его совместно с интеллектуальными цифровыми системами управления.

Светодиодные драйверы, функционирующие ниже номинальной мощности, из-за изменения яркости свечения, могут оказаться источниками, усиливающими нечетные токовые гармоники, мерцание, скачки напряжения и несимметрию нагрузки, что может приводить к отклонениям отклонения как по фазе, так и по частоте, резонансу в распре-

делительных сетях и увеличению потерь при передаче электрической энергии.

Следует также отметить и температуру окружающей среды, которая также оказывает сильное влияние как на светодиоды, так и на их драйверы и может значительно снижать срок службы данных устройств, как электрические параметры, так и световые характеристики, такие как спектр излучения, коррелированная цветовая температура и даже координаты цветности «х» и «у» [13, 14].

**Проведение измерений.** В данных исследованиях используется методология обнаружения и классификации нарушений сигнала мощности и других параметров осветительного оборудования, в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008):

- переходный процесс: холодный запуск;
- возможное: поддержание пониженного/повышенного напряжения;
- устойчивое состояние: гармоники, мерцание и колебания частоты.

В рамках данного исследования процесс измерений проходил в два этапа (на открытом воздухе и в помещении) при выполнении следующих условий:

- на испытательной площадке было организовано независимое стабилизированное питание 230В с применением стабилизатора напряжения-фазоинвертора ТЕРЛОСОН 600 В·А для каждого светодиодного прожектора;

- пусковые токи светодиодных светильников измерялись при холодном пуске и после 10, 30 и 90 секунд задержки после сброса питания. Измерения проводились с помощью токоизмерительных клещей.

Напряжение, ток, потребляемая мощность и гармоники тока измерялись с помощью анализатора качества электрических цепей С.А 8335 QUALISTAR PLUS. Измерения проводились для всех прожекторов после 15-минутного периода включения питания для уверенности в стабилизации переходных процессов в осветительных приборах. Измерения проводились при температуре окружающей среды в диапазоне 10 °С на улице и 19 °С в помещении.

В табл. 1 приведены измерения напряжения и электрического тока, проведенные на четырех образцах прожекторов П1-П4. На рис. 1 приведены измеренные гармоники тока, генерируемые светодиодными прожекторами по результатам измерений. Отдельное измерение гармоник напряжения не проводилось, так как, как правило, данные показатели находятся в допустимых пределах [15].

По результатам измерений было определено, что в токе преобладают гармоники 3, 5, 7, 9 и даже 11 порядка, которые характерны для многих силовых электронных преобразователей и импульсных источников питания. Измеренные гармоники тока колебались в пределах среднего значения около 14 %, однако разброс значений в данном случае может являться существенно важным параметром, необходимым для учета издержек при переоборудовании уличных сетей освещения на энергоэффективные светодиодные прожекторы. Следовательно, правильный подбор параметров светодиодного прожектора может оказывать существенное влияние на качество электрической энергии в сетях освещения.

Также были зафиксированы 10-минутные средние значения коэффициента  $\text{tg}\varphi$ , который представляет собой отношение потребляемой реактивной

Измерения электрических параметров исследуемых светодиодных прожекторов

№ п.п	Номинальный ток, А	Напряжение, В	Частота, Гц	Общее гармоническое искажение	Пусковой ток (холодный пуск), А	Пусковой ток (10/30/90 секунд), А
П1	0,99	231,1	50,03	8 %	5,96	3,2/4,3/4,7
П2	0,94	230,5	50,01	9 %	7,98	3,7/6,0/7,01
П3	0,88	230,2	49,93	11 %	8,11	2,41/3,03/4,01
П4	0,89	230,0	49,83	15 %	1,21	1,12/1,14/1,14

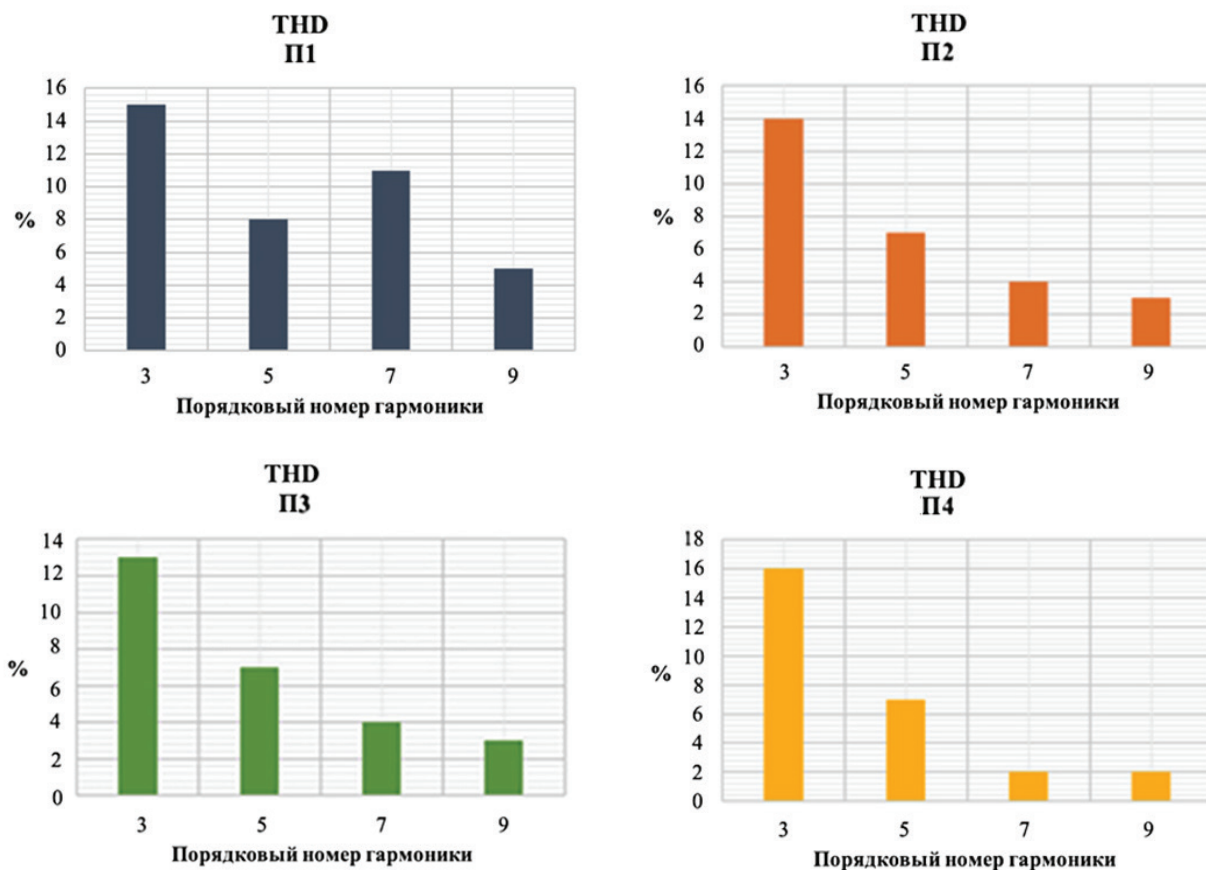


Рис. 1. Измеренные гармоники тока в исследуемых светодиодных прожекторах, где THD П1–П4 — процентная составляющая гармоник тока прожекторов П1–П4

энергии к активной. Данный коэффициент всегда был отрицательным, что означает, что, с точки зрения электросети, здание было приемником, который поглощал емкостную реактивную мощность. Также отрицательный коэффициент  $\text{tg}\phi$  характерен для нагрузки с высокой насыщенностью электронных преобразователей электрической энергии.

При наличии нелинейных нагрузок деформированный ток может послужить причиной падения напряжения и привести к изменению импеданса проводов. В результате искаженная форма волны напряжения будет воздействовать на остальные нагрузки в той же цепи, вызывая прохождение гармоник через ток, даже если они являются линейными нагрузками. Несмотря на то, что из-за малой мощности используемых преобразователей абсолютные значения гармонических токов невелики, суммарный эффект в виде искажений тока и напряжения может быть значительным, особенно при последо-

вательном включении большого количества светодиодных прожекторов.

Во всех исследуемых прожекторах потребляемая мощность достигала значений выше номинальных до 5 %. Также все прожекторы генерировали в сеть реактивный ток, коэффициент мощности варьировался от 0,91 до 0,96. Данные значения можно отнести к категории самого высокого уровня коэффициента мощности, который можно найти в осветительных приборах данного типа. Примечательно, что во всех случаях реактивные токи имели емкостную природу, тогда как реактивные токи, создаваемые балластами газоразрядных ламп, как правило, являются индуктивными.

Пусковые токи при холодном пуске, в среднем, были до 4–5 раз выше, чем значения в установившемся режиме.

Также было отмечено, что для прожектора П4 значения пускового тока относительно его устано-

вшегосостояния были незначительно выше во всех случаях. Это был тот же прожектор с наиболее высоким уровнем третьей гармоники. Скорее всего, данный фактор обусловлен тем, что, по сравнению с другими осветительными приборами, данный прожектор, был оснащен другой светодиодной матрицей. Первые три прожектора были оснащены светодиодами с рабочим напряжением 48 В постоянного тока, в то время как прожектор П4 имел светодиоды с рабочим напряжением 120 В.

По сравнению с холодным и горячим пусками пусковые токи уменьшались до 2,5 раза, показывая выраженную тенденцию к увеличению при более длительном отключенном состоянии драйвера.

Незначительное ухудшение формы волны тока было отмечено при проведении измерений в помещении. Однако без дополнительных измерений при повышенных температурах делать какие-либо выводы в данном случае затруднительно. Поэтому следует проводить полные измерения во всем диапазоне рабочих температур, так как в случае увеличения гармонических искажений при росте температуры, соответствующая запись должна быть добавлена в протоколы испытаний и сертификации осветительного оборудования с светодиодными источниками света. Средняя, высокая и низкая температуры, характерные для данной местности, должны использоваться в качестве важного параметра для проверки реального потребления оборудования.

**Заключение.** В современных экономических реалиях, как правило, главными критериями (а во многих случаях единственными) для выполнения реконструкции сетей освещения, является окупаемость инвестиций, при этом в предварительных экономических расчетах обычно используются технические характеристики, взятые на основании общей информации производителей оборудования. Однако в большинстве случаев эти данные могут быть искажены и иметь значительные отличия от жестких реальных условий эксплуатации и стандартные испытания не полностью охватывают данный процесс.

В исследуемых светодиодных прожекторах в целом было обнаружено, что основными элементами искажения качества электроэнергии являются генерируемый нечетный гармонический ток и пусковые токи при включении, которые значительно выше, чем у газоразрядных ламп.

Для решения вопроса кратковременных бросков пусковых токов следует использовать новые термомангнитные выключатели с более высоким гистерезисом, который позволяет более тонкую настройку характеристик.

С точки зрения экономической и финансовой прибыльности, результаты массового перехода на мощное светодиодное освещение могут быть сильно подвержены влиянию переходных процессов в электрической сети, конечной стоимости оборудования и времени его наработки до отказа, с учетом того, что было обнаружено, что в полевых условиях во многих случаях реальные параметры потребления превышают значения, указанные производителями.

Данные факторы могут оказывать сильное влияние на экономический анализ, проводимый для оценки рентабельности инвестиций, в результате чего разница между заявленными и реальными значениями потребления может в значительной степени повлиять на экономическую эффективность и окупаемость проводимых работ. Поэтому для

крупных проектов по реконструкции сетей освещения и переходу на энергоэффективные технологии целесообразно производить полевое тестирование осветительного оборудования, для более точного определения эксплуатационных расходов и более реалистичной экономической оценки проекта. Все эти технико-экономические параметры в совокупности необходимо учитывать, прежде чем проводить масштабную модернизацию осветительного оборудования на энергоэффективные светодиодные технологии.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-01056 А.

## Библиографический список

1. Rodrigues C. R., Almeida P. S., Soares G. M. [et al.]. An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 27 – 30 June 2011. Gdansk, Poland. 2011. P. 141 – 146. DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984147.
2. Jenkins D., Bhargava A. LED Lighting: Maximizing the reliability, safety, and efficiency of light fixtures in hazardous environments // IEEE Industry Applications Magazine. 2015. Vol. 21. P. 64 – 67. DOI: 10.1109/MIAS.2014.2345829.
3. Хейз К. Современные подходы к качественному и недорогому энергоэффективному освещению // Современная светотехника. 2013. № 6. С. 59 – 61.
4. Сактоев В. Е., Баташов А. И., Чередов Э. Н. Исследование характеристик светодиодного светильника RC-R251-001 // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2017. № 1. С. 49 – 55.
5. Кузьменко В. П. «Исследование воздействия жизненного цикла светодиодной продукции на окружающую среду» // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 12 (114). С. 91 – 94.
6. Beccali M., Bonomolo M., Ciulla, G. [et al.]. Improvement of energy efficiency and quality of street lighting in South Italy as an action of Sustainable Energy Action Plans. The case study of Comiso (RG) // Energy. 2015. Vol. 92. P. 394 – 408. DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.003.
7. Ferrara R. The smart city and the green economy in Europe: A critical approach // Energies. 2015. Vol. 8. P. 4724 – 4734. DOI: 10.3390/en8064724.
8. Markovska N., Duic N., Mathiesen B. V. [et al.]. Addressing the main challenges of energy security in the twenty-first century Contributions of the conferences on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems // Energy. 2016. Vol. 115. P. 1504 – 1512. DOI: 10.1016/j.energy.2016.10.086.
9. Дед А. В., Вольнкин А. И., Денисенко М. Ю., Кириченко Н. В., Сухов Е. С. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). P. 157 – 158.
10. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. 2-е изд. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
11. Mahela O. P., Shaik A. G., Gupta N. A critical review of detection and classification of power quality events // Renew. Sustain. Energy Rev. 2015. Vol. 41. P. 495 – 505. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.070.
12. Wu C. N., Chen Y. L., Chen Y. M. Primary-side peak current measurement strategy for high-precision constant output current control // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30 (2). P. 967 – 975. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2312955.
13. Кузьменко В. П., Шишлаков В. Ф., Солёный С. В., Квас Е. С., Солёная О. Я. Исследовательские испытания све-

тодиодных источников света // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Vol. 62 (7). P. 632–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640.

14. Gil-de-Castro A., Moreno-Mucoz A., Larsson A. [et al.]. LED Street lighting: A power quality comparison among street light technologies // Light. Res. Technol. 2013. Vol. 45. P. 710–728. DOI: 10.1177/1477153512450866.

15. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Шишлаков В. Ф., Соленая О. Я. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами // Научный вестник НГТУ. 2019. № 1 (74). С. 197–212. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212.

**КУЗЬМЕНКО Владимир Павлович**, аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники (№ 32).

Адрес для переписки: mg.konnny@gmail.com

**СОЛЁНЫЙ Сергей Валентинович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электромеханики и робототехники (№ 32).

Адрес для переписки: ssv555sv@yandex.ru

#### Для цитирования

Кузьменко В. П., Солёный С. В. Исследование влияния светодиодных прожекторов на качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 15–19. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-15-19.

Статья поступила в редакцию 06.02.2021 г.

© В. П. Кузьменко, С. В. Солёный