

## **Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами\***

**В.П. КУЗЬМЕНКО<sup>a</sup>, С.В. СОЛЕНЬ<sup>b</sup>, В.Ф. ШИШЛАКОВ<sup>c</sup>, О.Я. СОЛЕНАЯ<sup>d</sup>**

*190000, РФ, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

*<sup>a</sup>mr.konnny@gmail.com   <sup>b</sup>ssv555ssv@yandex.ru   <sup>c</sup>osolenaya@list.ru*

*<sup>d</sup>svfmail@yandex.ru*

В последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей, таких как торговые комплексы, офисные и жилые помещения, учебные заведения, сети наружного и фасадного освещения. Одной из причин обострения данной проблемы является постоянное увеличение использования светодиодного осветительного оборудования в электроустановках не только данного типа, но и всех типов в целом. Для выявления ухудшения качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей, таких как торговые комплексы, офисные и жилые помещения, учебные заведения, сети наружного освещения с массовым использованием светодиодных источников света, было решено поставить эксперимент по анализу качества электрической энергии в электроустановке здания одного из учебных заведений Всеволожского района, которое было постепенно полностью переведено на использование светодиодного осветительного оборудования в учебных классах, административных помещениях и рекреационных зонах здания школы и на уличных площадках.

В рамках проведенного исследования рассмотрены результаты влияния на спектральный состав токов и напряжений современных светотехнических приборов на основе светодиодов; выявлены негативные воздействия, которые приводят к росту тока в нулевом проводе даже при полностью симметричном характере нагрузки. Проведенные исследования показывают, что в распределительных сетях из-за светодиодных источников света наблюдаются значительные искажения формы кривых тока. Так, наличие полного гармонического искажения фазы с наибольшей осветительной нагрузкой сети в течение дня доходит до 90 %.

Данные исследования показывают, что, несмотря на заявленные в паспортах светильников данные, удовлетворяющие нормативным документам настоящего времени, массовое использование светодиодного осветительного оборудования приводит к проблемам, следствием которых может являться ухудшение качества электропитания, а значит, подобные нагрузки способны сильно усложнить жизнь потребителей электроэнергии, причиняя в том числе экономические убытки. Таким образом, вопрос модернизации оборудования и перехода на энергосберегающие технологии в виде светодиодных светильников все еще является неоднозначным.

---

\* Статья получена 20 сентября 2018 г.

**Ключевые слова:** электроснабжение жилых и общественных зданий, электропроводка, качество электроэнергии, высшие гармоники тока и напряжения, электромагнитная совместимость, светодиодное освещение

## ВВЕДЕНИЕ

С введением в России Федерального закона от 29.07.2018 № 255-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1], который стимулирует потребителей к применению энергосберегающих технологий и устройств в современных электроустановках, все больше используются световые приборы с повышенной энергоэффективностью, к которым в настоящее время относятся светодиодные светильники, лампы, прожекторы. Но данные осветительные устройства содержат в себе элементы с нелинейными вольтамперными характеристиками, что по сути дела усугубляет проблему качества электроэнергии в сетях административного и потребительского назначения [2].

Появление токов несинусоидальной формы является одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии. Появление высших гармоник тока и напряжения неблагоприятно влияет на работу электрооборудования, устройства релейной защиты, а также является одной из причин ухудшения качества сетей передачи информации, увеличивает наличие повышенных номиналов токов в нулевом проводнике, что вызывает процессы, ускоряющие старение изоляции.

Конечно, основным источником гармонических искажений в распределительных сетях являются нелинейные нагрузки крупных промышленных потребителей [3]. Однако в последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей, таких как торговые комплексы, офисные и жилые помещения, учебные заведения, сети наружного и фасадного освещения. Данную проблему связывают в том числе и с постоянно увеличивающимся использованием светодиодного осветительного оборудования в электроустановках не только данного типа, но и всех типов в целом.

В работе [4] подробно описано наличие нечетных гармоник в светодиодных прожекторах, приводящих к возможным явлениям резонанса токов данных гармоник.

Стоит также обратить внимание на то, что нередко производители, пытаясь сэкономить, прибегают к применению некачественных материалов, что в целом негативно влияет на стратегию энергоэффективного развития предприятий. Использование некачественной элементной базы приводит к реальному ухудшению характеристик электротехнических изделий [5].

Высшие гармоники тока и напряжения влияют на погрешности электроизмерительных приборов. В практике эксплуатации существенное значение имеет увеличение погрешностей индукционных счетчиков активной и реактивной энергии. Значения этих погрешностей существенно отражаются при учете потребления электрической энергии. Наличие высших гармоник затрудняет и в ряде случаев делает невозможным использование силовых цепей в качестве каналов для передачи информации [6].

Применение импульсных обратноходовых преобразователей широко распространено в светодиодных светильниках. Совместно с LC-фильтрами (например, выпрямитель с емкостным фильтром) они могут вызывать значительные искажения тока, что неизбежно ведет к искажению напряжения и, как следствие, к сокращению сроков службы и сбоям в работе потребителей электрической сети, ускоренному старению изоляции и др. [7].

Для выявления влияния данных факторов было решено поставить эксперимент по анализу качества электрической энергии в электроустановке административного здания учебного заведения МОУ «СОШ № 3» Всеволожского района, которое было постепенно полностью переведено на использование светодиодного осветительного оборудования в учебных классах, административных помещениях и рекреационных зонах здания школы и на уличных площадках.

Для измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения использовался трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии С.А 8335 QUALISTAR PLUS фирмы CHAVIN ARNOUX. Прибор является трехфазным графическим анализатором параметров электросети переменного и постоянного тока с высокой предельной синусоидальной мощностью измерительной категории IV в соответствии со стандартом ГОСТ IEC 61010-1-2014 [8]. Погрешность прибора СА 8335 точнее 1 % (погрешность датчиков тока не включена).

С помощью прибора можно провести следующие измерения:

- значения переменных напряжений до 1000 В между терминалами;
- значения переменного тока до 6500 А/с (нулевой провод включен);
- измерение минимальных и максимальных значений напряжения и тока полупериода;
- пиковые значения напряжения и тока (нулевой провод не включен);
- измерение частоты электросети в 50 Гц и 60 Гц;
- коэффициент амплитуды тока и напряжения (пик-фактор) (нулевой провод не включен);
- расчет К-фактора трансформатора составляющей тока (KF);
- коэффициент гармоник (DF) для тока и напряжения (нулевой провод не включен);
- общий коэффициент гармонических искажений для тока и напряжения (нулевой провод не включен);
- активная, реактивная (емкостная и индуктивная) и полная мощность отдельной фазы и всех фаз (нулевой провод не включен);
- вычисление  $\cos(\varphi)$  коэффициента реактивной мощности (DPF) и коэффициента мощности (PF) (нулевой провод не включен);
- вычисление краткосрочных дрожаний (flicker) напряжения (PST) (нулевой провод не включен);
- измерение, вычисление и отображение гармоник тока и напряжения до 50-го порядка с их фазовой информацией: значения, процентное отношение, значения максимума.

Измерения проводились в соответствии с методикой, подробно изложенной в инструкции к прибору, которая соответствует ГОСТ 30804.4.30–2013 (IEC 61000-4-30:2008) [9].

Основной задачей данного эксперимента является определение влияния светодиодного осветительного оборудования на качество электроэнергии, спектральный состав токов и напряжений питающей сети, частоту и другие параметры электрической сети, а также выявление нелинейных характеристик элементной базы элементов питания светодиодного оборудования, сравнение фактических данных с заявленными в паспортах производителя изделия.

## 1. ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента анализатор качества С.А 8335 QUALISTARPLUS был подключен сначала на один питающий ввод электроустановки административного здания, а затем на другой. Подключение прибора осуществлялось согласно инструкции – пофазно, с расположением контактных колец по направлению от питающих фидеров к отходящим линиям (рис. 1).

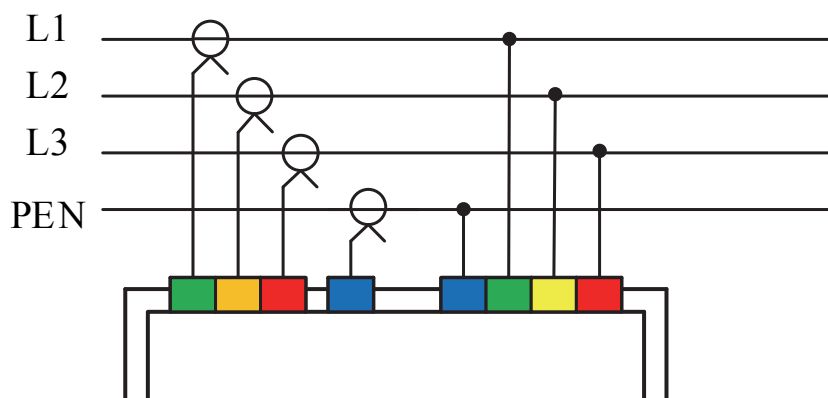


Рис. 1. Блок-схема подключения прибора

Fig. 1. Flow chart of the device

Прибор работал от сети круглосуточно в течение недели на одном вводе, а затем в течение недели – на другом. Данный способ постановки эксперимента был выбран для того, чтобы не препятствовать процессу обучения в учебном учреждении и определить исследуемые факторы непосредственно в самом рабочем процессе электроустановки и согласно распорядку дня учебного учреждения.

Здание школы оборудовано светодиодными светильниками типа PPO 1200/L 40W 4000K IP20 фирмы Jazzway (рис. 2) в рекреационных зонах и помещениях учебных классов, а также светильниками типа PPL 600 40w 4000K IP40 в административных и хозяйственных помещениях и учебных классах. Наличие в помещениях школы ламп накаливания и люминесцентных светильников не превышает 5 % от общего количества светильников. Здание школы также оборудовано светодиодными уличными прожекторами.



Рис. 2. Внешний вид светильника (фото с места установки)

Fig. 2. The lamp appearance on the installation site

Характеристики светильника PPO 1200/L 40W сведены в таблицу [10].

#### Характеристики светильника PPO 1200/L 40W

##### The PPO 1200/L 40W lamp characteristics

Источник света	светодиоды SMD2835
Количество светодиодов	38/76 шт.
Цветовая температура	4000 К, 6500 К
Угол освещения	120°
Индекс цветопередачи	$Ra \geq 75$
Входная частота	50 Гц
Коэффициент пульсации	$\leq 5 \%$
Материал корпуса	алюминиевый сплав
Материал плафона	опаловый поликарбонат
Тип рассеивателя	опаловый
Температура эксплуатации	-20...+40 °C
Срок службы светодиодов	25 000 часов
Напряжение драйвера	входное 180...240 В выходное: 30...42 / 90...100
Максимально допустимое количество светильников в линию	25 шт.
Драйвер типовой	PPS-CVP 12040 IP67
Мощность драйвера	40 / 60 Вт
Входное напряжение / выходной ток	100 / 0,70...264 / 0,32...3,3

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента представлены на соответствующих графиках, которые описывают поведение измеряемых параметров в зависимости от характеристик нагрузки электрической сети административного здания.

Для определения характера распределения нагрузок приведем график активной мощности, изображенный на рисунке ниже (рис. 3).

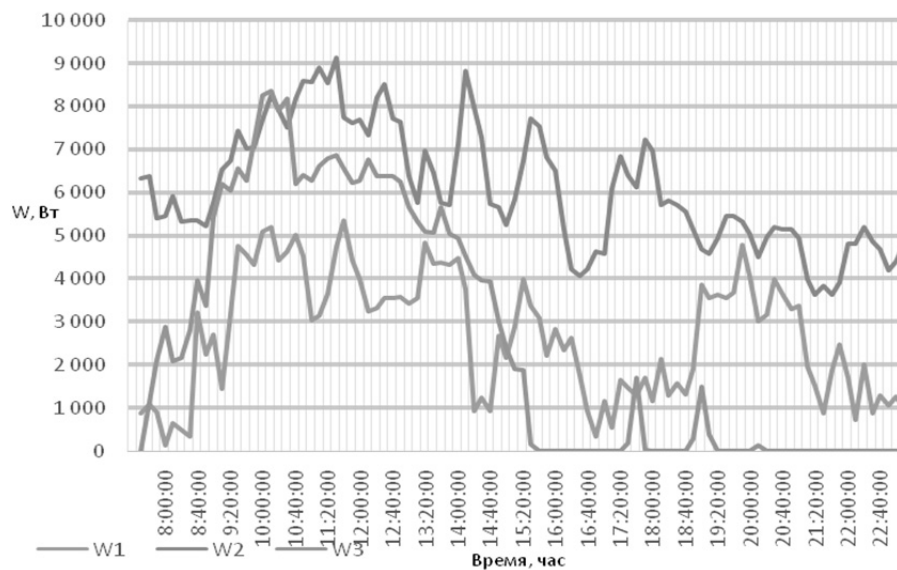


Рис. 3. График активной мощности

Fig. 3. Active power curve

По графику активной мощности, где  $W1$  – активная мощность фазы  $A$ ,  $W2$  – активная мощность фазы  $B$ , можно определить характер распределения нагрузок пофазно, а также время загруженности той или иной фазы. Анализ осциллограммы (рис. 1) показывает, что фаза (кривая  $W2$ ) имеет относительно постоянный характер нагрузки, в то время как фазы (кривые  $W1$  и  $W3$  соответственно) имеют промежуточный (дневной) характер нагрузки. Это связано с тем, что к фазе  $W2$  помимо оборудования, востребованного в дневное время (компьютеры, освещение и др.), присоединено оборудование, используемое с большим коэффициентом спроса и в ночное время суток (вентиляция, сигнализация, видеонаблюдение, уличное освещение).

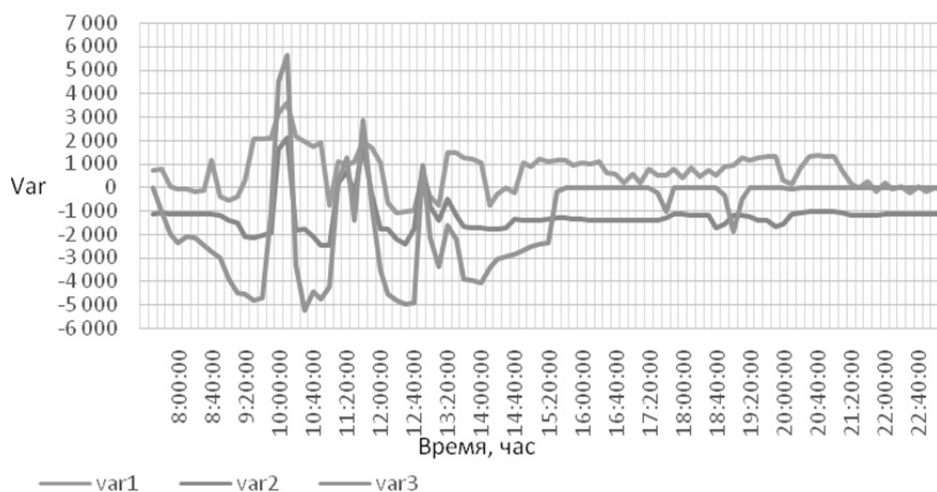


Рис. 4. График реактивной мощности

Fig. 4. Reactive power curve

Из графика реактивной мощности видно, что потребители имеют реактивную мощность, наиболее выраженную по фазе (кривая var3 – фаза C), на которую подключено наибольшее количество светодиодного осветительного оборудования.

На рис. 6 изображен график изменения значений тангенса  $\tan(f)$  по фазам.

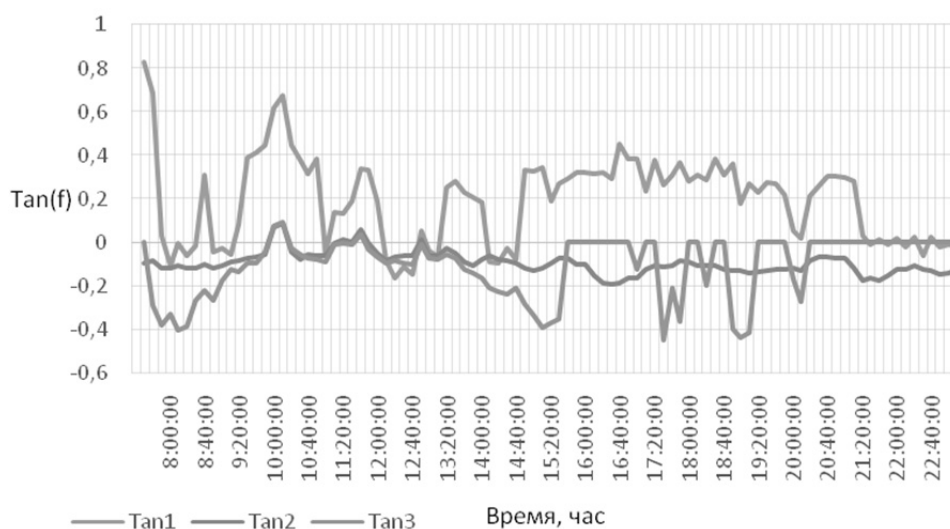


Рис. 5. График измерения параметров  $\tan(f)$

Fig. 5. Graph of measurements of the  $\tan(f)$  parameters

Отрицательные значения говорят о том, что в данный момент времени нагрузка на фазах под индексами Tan3 и Tan2 имеет ярко выраженный активно-емкостной характер [11]. Исходя из графика делаем вывод, что как минимум по двум фазам в течение дня  $\tan(f)$  отрицательный, что говорит о весомом наличии активно-емкостной нагрузки. Это значит, что одну четверть периода энергия электромагнитного поля передается от источника к приемнику и накапливается там, вторую четверть – возвращается назад (считаем нагрузку чисто индуктивной или чисто емкостной, потери на перемагничивание отсутствуют, емкость идеальна, сопротивление проводов равно нулю) [12].

Активная энергия действительно потребляется электроприемниками, т. е. преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую и т. д.), а реактивная ввиду особенности реактивных элементов накапливать энергию возвращается в сеть, загружая ее по сути вредоносной составляющей.

Выходом из создавшейся ситуации является применение конденсаторных компенсирующих устройств. Однако здесь нужно предостеречь от возможной перекомпенсации, когда реактивная энергия не потребляется, а генерируется.

Далее рассмотрим процентное содержание гармонической составляющей по току. Обратим внимание на нечетные гармоники, наиболее явно выраженные в данном случае, – 3 и 5, которые изображены на рис. 6 и 7. Также были обнаружены не характерные для такого вида нагрузки четные гармоники, их наличие в электрической сети варьируется от 0,5 до 2,5 %, чередуясь от 2-го до 10-го порядка.

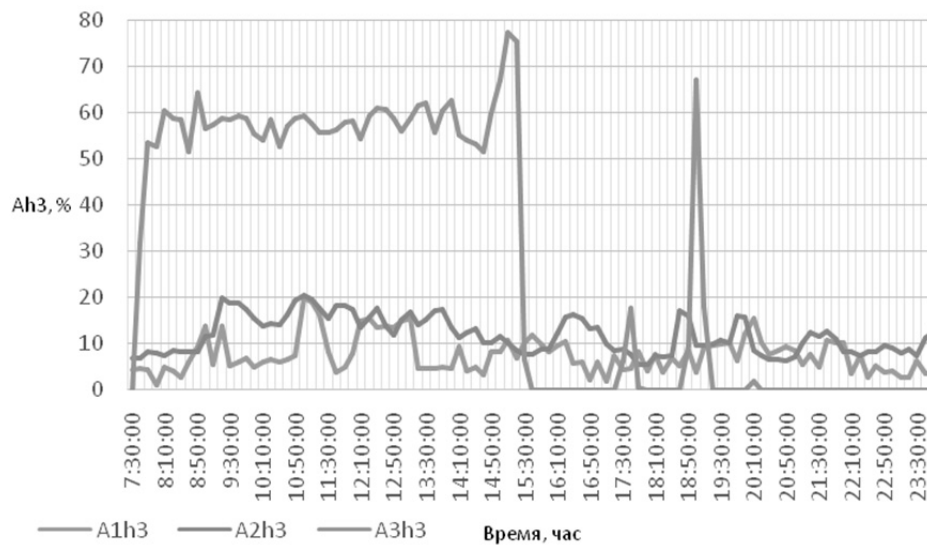


Рис. 6. Гармоническая составляющая 3-го порядка в процентном соотношении

Fig. 6. Harmonic component of the 3d order in percentage terms

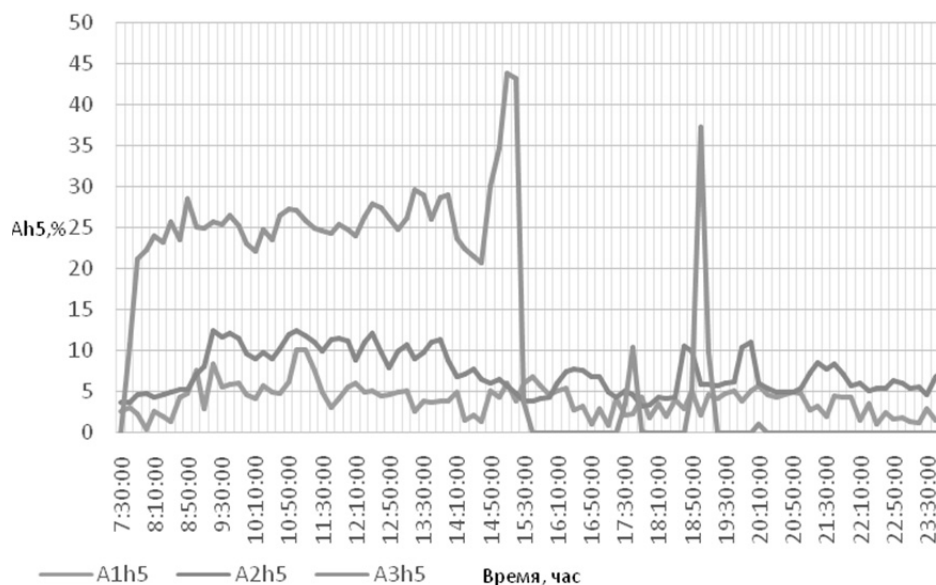


Рис. 7. Гармоническая составляющая 5-го порядка в процентном соотношении

Fig. 7. Harmonic component of the 5<sup>th</sup> order in percentage terms

Таким образом, наличие 3-й гармоники тока превышает предельно допустимое значение более чем на 40 %; наличие 7-й гармоники находится на пороге предельно допустимых значений, периодически имея сильные броски, выходящие за пределы этих значения; наличие 9-й и 11-й также находится в зоне предельно допустимых значений, периодически выходя из нее на 2...5 %, гармоники более высокого порядка заметны, но не выходят за пределы допустимых значений [4, 13].



На рис. 8 представлен график полного гармонического искажения по фазам.

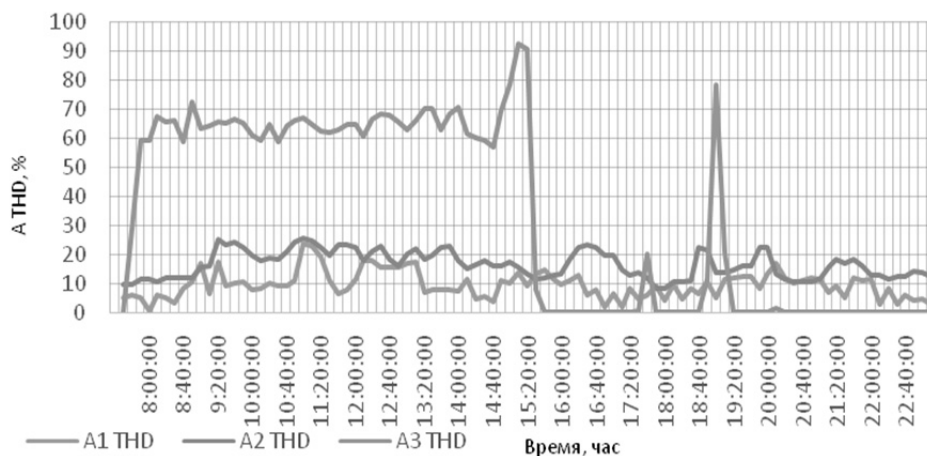


Рис. 8. График полного гармонического искажения

Fig. 8. Curve of full harmonic distortion

Основываясь на полученных графиках, можно сделать вывод, что измеренные значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения выходят за нормы, установленные в ГОСТ 32144-2013, вплоть до 11-го порядка, особенно сильно выражена фаза C (A3 THD) на графике (рис. 8).

На рис. 9 показаны среднеквадратические значения напряжения по фазам.

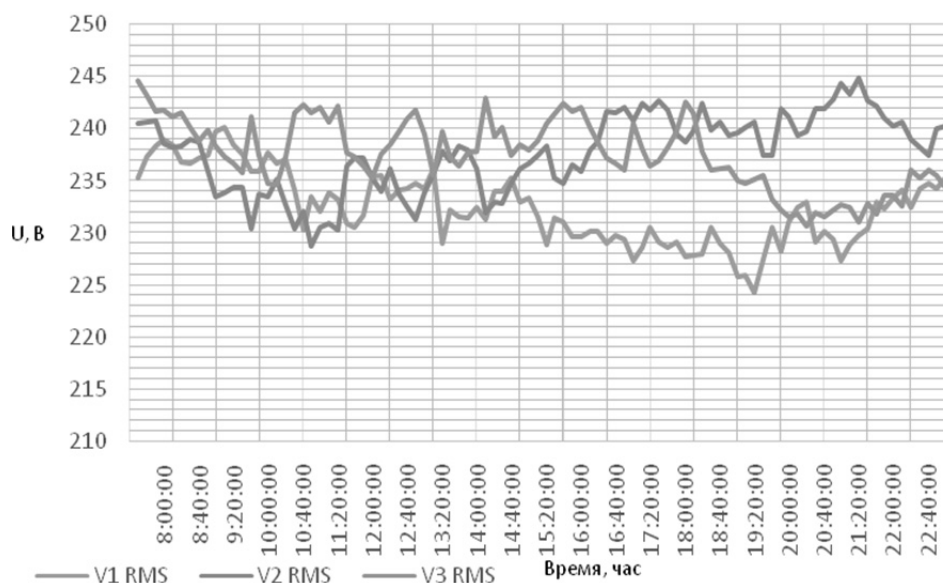


Рис. 9. Среднеквадратические значения напряжения

Fig. 9. Root-mean-square value of voltage

Из рис. 9 видно, что при резком возрастании нагрузки (в данном случае это включение освещения в помещениях школы) происходит резкое увеличение потерь напряжения в ветвях сети, питающих эту нагрузку. Но в тот же момент происходит заметный скачок напряжения (до 250 В) на приемном узле ветви, что говорит о потребителях с резкопеременным характером потребления мощности (особенно реактивной), что было бы нормальным для потребителей в заводских цехах, но никак не в административных зданиях [11, 14].

На рис. 10 представлен график максимумов краткосрочного дрожания (фликера).

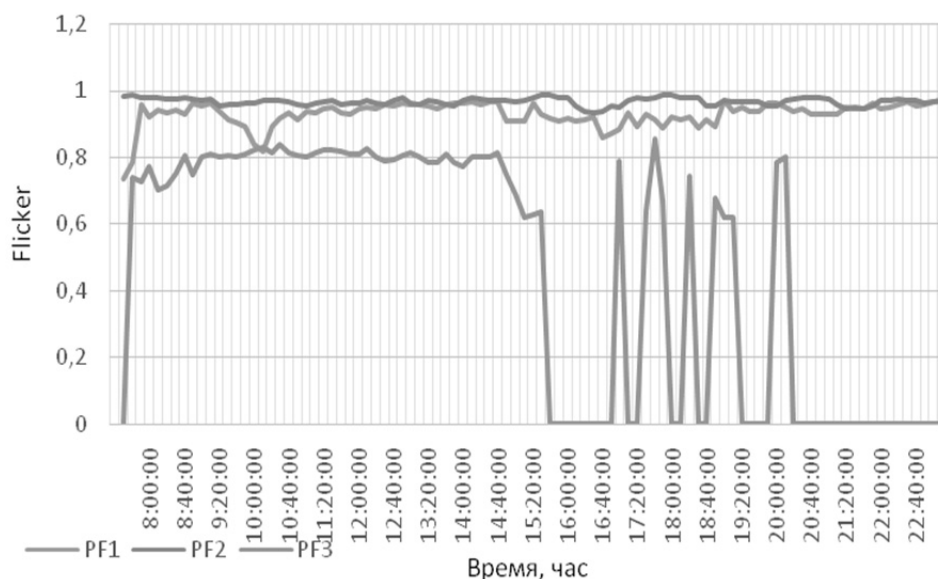


Рис. 10. Краткосрочное дрожание (фликер)

Fig. 10. Short-term jitter (flicker)

Фликер (от англ. flicker – «мигать») – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера PSt в точках общего присоединения потребителей электрической энергии, располагающих лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, равно 1,0, а для длительной дозы фликера PLt в этих же точках равно 0,74 в интервале времени 10 минут. На графике видно, что в течение дня эти значения превышают допустимые нормы [15, 16].

Это явление вызывает ухудшение самочувствия, раздражение, иногда головные боли, т. е. вызывает дискомфорт и снижение эффективности работы у человека. Исследования показывают, что максимальная нагрузка возникает при частоте, равной примерно девяти изменениям освещенности в секунду, что эквивалентно частоте в 9 Гц [17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные исследования показывают, что, несмотря на заявленные в паспортах светильников данные, удовлетворяющие нормативным документам настоящего времени, массовое использование светодиодного осветительного оборудования несет за собой проблемы, следствием которых может являться ухудшение качества электропитания, а также экономические убытки.

Также выявлено, что высшие гармоники могут вызывать перегрев проводов и нулевых шин, повреждения конденсаторов в системах компенсации мощности, проблемы коммутации, особенно для устройств защитного отключения, а также приводить к периодическому изменению светового потока в результате изменения напряжения питания освещения [18].

Проведенные исследования показывают, что в распределительных сетях из-за светодиодных источников света наблюдаются значительные искажения формы кривых токов. Так, наличие 3-й гармоники тока превышает предельно допустимое значение более чем на 40 %, наличие 7-й, 9-й, 11-й гармоник – на 2...5 %. Гармоники более высокого порядка также заметны, но не выходят за пределы допустимых значений. Также были заметны нехарактерные для такого вида нагрузки четные гармоники, их наличие в электрической сети варьируется от 0.5 до 2.5 %. В результате наличие полного гармонического искажения фазы с наибольшей осветительной нагрузкой сети в течение дня доходит до 80...90 %. Полученные данные явно противоречат нормально допустимым значениям, которые в соответствии с ГОСТом в номинальном режиме не должны превышать 8 %, а в предельно допустимом – 12 % [16, 19].

Во многих случаях уровень искажений превышает пределы, определяемые государственными стандартами [13,16]. Кроме того, такие источники света приводят к росту тока в нулевом проводе даже при полностью симметричном характере нагрузки [20] и, как следствие, к аварийным ситуациям из-за перегорания нулевого провода.

Наиболее простым решением для наружного освещения будет установка пассивных фильтров гармоник в распределительной сети освещения. В работе [3] показано, что наибольшую эффективность такой фильтр будет иметь при включении в сеть одновременно с включением электроприемника, для которого он предназначен. Со световыми приборами бытового назначения не все так однозначно, так как невозможно прогнозировать количество и распространенность таких световых приборов у населения. Поэтому для решения такой задачи наиболее подходящими были бы активные фильтры [2]. При этом стоимость активного фильтра для бытовой сети будет как минимум на порядок выше [21].

Таким образом, модернизация оборудования и переход на энергосберегающие технологии могут привести к ухудшению качества электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 29.07.2018 № 255-ФЗ «О внесении изменений в статьи 7 и 22 Федерального закона “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации”».
2. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / С.А. Темербаев, Н.П. Боярская, В.П. Довгун, В.О. Колмаков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 107–120.

3. Боярская Н.П., Довгун В.П., Кунгс Я.А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2012. – 123 с.
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. Фазлиева Я.С., Ахмадеева О.А. Проблемы энергосбережения и энергоэффективности зданий в России [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2016. – № 7. – С. 1020–1022. – URL: <https://moluch.ru/archive/111/27864/> (дата обращения: 29.03.2019).
6. Степанов В.М., Базыль И.М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – № 12-2. – С. 27–31.
7. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 632 с. – ISBN 978-5-383-00403-6.
8. ГОСТ ИЕС 61010-1-2014. Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Ч. 1. Общие требования. – Введ. 2015-09-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 130 с.
9. ГОСТ 30804.4.30-2013 (ИЕС 61000-4-30:2008). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
10. Официальный сайт торговой марки Jazzway, производителя светодиодного оборудования [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.jazz-way.com/> (дата обращения: 29.03.2019).
11. Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника: учебник и практикум для СПО. – М.: Юрайт, 2018. – 206 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 978-5-534-05204-6.
12. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
13. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 41 с.
14. Ананичева С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии: регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие. – 3-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с.
15. ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
16. ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 2007-07-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 23 с.
17. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шароль, А.Ю. Воробьев; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
18. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
19. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
20. Боярская Н.П., Довгун В.П. Влияние светодиодных источников света на спектры токов и напряжений питающей сети // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3. – С. 195–199.
21. Официальный сайт компании ООО «Хомов электро», производителя компенсирующих устройств [Электронный ресурс]. – URL: <http://khomovelectro.ru/articles/aktivnye-i-passivnye-filtry-garmonik-primenenie-problemy-i-tendentsii.html> (дата обращения: 29.03.2019).

Кузьменко Владимир Павлович, аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основные направления научных исследований: энергосбережение и повышение энергетической эффективности, электроизмерения, светодиодные источники света. Является автором 6 публикаций. E-mail: mr.konnny@gmail.com

*Солёный Сергей Валентинович*, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, заместитель директора по научной работе Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основные направления научных исследований: электро-, пожаро- и взрывобезопасность; развитие систем «Умный дом» и Smart Grid; надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения; робототехника; киберфизические системы. Является автором 170 публикаций, включая одну монографию, 9 учебных пособий и 37 статей в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 23 публикации, входящие в системы Scopus, Web of Science и РИНЦ, 7 патентов на полезную модель, а также один патент на промышленный образец. E-mail: ssv555ssv@yandex.ru

*Солёная Оксана Ярославовна*, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, заместитель директора по учебно-воспитательной работе Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основные направления научных исследований: энергосбережение и повышение энергетической эффективности; развитие методов оценки безопасности технологических объектов. Является автором 95 публикаций, включая 5 учебных пособий и 30 статей в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 25 публикаций, которые входят в системы Scopus, Web of Science и РИНЦ, 11 патентов на полезную модель, а также один патент на изобретение. E-mail: osolenaya@list.ru

*Шишлаков Владислав Федорович*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основное направление научных исследований – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала. Является автором более 200 публикаций, включая 3 монографии, 15 учебных пособий и 56 статей в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 30 публикации, входящих в системы Scopus, Web of Science и РИНЦ, 5 патентов на изобретение. E-mail: svfmail@yandex.ru

*Kuzmenko Vladimir Pavlovich*, a postgraduate student at the department of electomechanics and robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The main field of his research includes power supply and increasing power efficiency, electrical measurements and LED sources of lighting. He has published 6 research papers. E-mail: mr.konnny@gmail.com

*Solenyj Sergei Valentinovich*, PhD (Eng.), an associate professor at the department of electomechanics and robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; deputy head for research in the Institute of Innovation Technologies in Electomechanics and Robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. His research interests are focused on electric, fire and explosion safety, development of Smart House and Smart Grid systems, reliability of sophisticated power supply systems, robotics and cyber-physical systems. He is the author of 190 publications including 1 monograph and 9 teaching manuals and 37 papers in leading scientific Russian and foreign journals, among them 23 papers in the Scopus, Web of Science and RSCI systems. He is also the holder of 7 useful model patents and 1 patent for a design. E-mail: ssv555ssv@yandex.ru

*Solenaja Oksana Yaroslavovna*, an associate professor at the department of electomechanics and robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; deputy head for teaching and educational work in the Institute of Innovation Technologies in Electomechanics and Robotics in the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Her research interests are focused on power supply and increasing power efficiency, and development of methods of technological object safety assessment. She is the author of 95 publications including 5 teaching manuals and 30 papers in leading scientific Russian and foreign journals, among them 25 papers in the Scopus, Web of Science and RSCI systems. She is also the holder of 11 useful model patents and 1 patent for a design. E-mail: osolenaya@list.ru

*Shishlakov Vladislav Fedorovich*, D. Sc. (Eng.), professor, head of the department of control in engineering systems; director of the Institute of Innovation Technologies in Electomechanics and Robotics; vice-rector for educational technologies and innovative activities in

the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. His research interests are focused on nonlinear systems of automatic control with different kinds of signal modulation. He is the author of more than 200 publications including 3 monographs, 15 teaching manuals and 56 papers in leading scientific Russian and foreign journals, among them 30 publications in the Scopus, Web of Science and RSCI systems. He is also the holder of 5 patents for a design. E-mail: svfmail@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212

### ***Measurement of power quality in the power supply system with LED lightning devices\****

V.P. KUZMENKO<sup>a</sup>, S.V. SOLYONYJ<sup>b</sup>, V.F. SHISHLAKOV<sup>c</sup>, O.Ya. SOLYONAJA<sup>d</sup>

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B Morskaya Street, St. Petersburg, 190000, Russian Federation*

<sup>a</sup>mr.konnny@gmail.com <sup>b</sup>ssv555ssv@yandex.ru <sup>c</sup>osolenaya@list.ru

<sup>d</sup>svfmail@yandex.ru

#### **Abstract**

In recent years there has been a significant deterioration in the quality of electrical energy in non-industrial consumer networks, such as shopping malls, offices, educational institutions, and outdoor and facade lights. One of the reasons for the aggravation of this problem is an increase in the usage of LED lighting equipment. To determine the effect of LED lighting equipment on electric power quality, measurement methods based on spectral analysis methods, comparison of the data obtained experimentally with the data recorded in the manufacturers' passports, identification of parameters beyond the limits established by state standards and other regulatory documents were used according to GOST 33073-2014, GOST 30804.4.30-2013, GOST IEC 61010-1-2014. They were used to check such parameters as the spectral composition of the currents and voltages of the supply power system, the frequency of the electrical network, and also the identification of the nonlinear characteristics of the element base of LED equipment. The effect of modern lighting devices based on LEDs on the spectral composition of currents and voltages is considered, and negative effects that lead to increasing electrical current in the neutral wire, even with a completely symmetrical nature of the load, are identified. The research shows that there are significant distortions in the shape of current curves in electrical power systems due to LED light sources. So, the presence of full harmonic phase distortion with the greatest lighting load of the power system during the day amounts to up to 90%. This research shows that a massive use of LED lighting equipment causes problems that can deteriorate power quality, and therefore make the situation for electricity consumers more difficult including economic losses.

**Keywords:** power supply of residential and public buildings, electrical wiring, power quality, high harmonics of current and voltage, electromagnetic compatibility, LED lighting

#### **REFERENCES**

1. Federal'nyi zakon ot 29.07.2018 N 255-FZ "O vnesenii izmenenii v stat'i 7 i 22 Federal'nogo zakona "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii" [On amendments to articles 7 and 22 of the Federal Law "On energy saving and improving energy efficiency and amending certain legislative acts of the Russian Federation"].

---

\* Received 20 September 2018.

2. Temerbaev S.A., Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Kolmakov V.O. Analiz kachestva elektroenergii v gorodskikh raspredelitel'nykh setyakh 0,4 kV [Analysis of power quality in distribution grids 0,4 kV]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2013, no. 1, pp. 107–120.

3. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Kungs Ya.A. *Problemy kompensatsii vysshikh garmonik v raspredelitel'nykh setyakh agropromyshlennogo kompleksa* [Problems of compensation of higher harmonics in the distribution networks of the agro-industrial complex]. Krasnoyarsk State Agrarian University. Krasnoyarsk, 2012. 123 p.

4. Saktov V.E., Batashov A.I., Cheredov E.N. Issledovaniye kharakteristik svetodiodnogo svetil'nika RC-R251-001 [The research of the led lamp RC-R251-001 characteristics]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya. – ESSUTM Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 49–55.

5. Fazlieva Ya.S., Akhmadeeva O.A. Problemy energosberezheniya i energoeffektivnosti zdaniy v Rossii [Problems of energy saving and energy efficiency of buildings in Russia]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2016, no. 7, pp. 1020–1022. Available at: <https://moluch.ru/archive/111/27864/> (accessed 29.03.2019).

6. Stepanov V.M., Bazyl I.M. Vliyanie vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiya na poteri elektricheskoi energii [The effect of higher harmonics in the power supply system electricity companies]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of the Tula state university. Technical sciences*, 2013, no. 12-2, pp. 27–31.

7. Rozanov Yu.K. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2nd ed. Moscow, MEI Publ., 2009. 632 p. ISBN 978-5-383-00403-6.

8. GOST IEC 61010-1–2014. Bezopasnost' elektricheskikh kontrol'no-izmeritel'nykh priborov i laboratornogo oborudovaniya. Ch. 1. Obshchie trebovaniya [State Standard 61010-1–2014. Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use. Pt. 1. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 130 p.

9. GOST 30804.4.30–2013 (IEC 61000-4-30:2008). Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmerenii pokazatelei kachestva elektricheskoi energii [State Standard 30804.4.30–2013 (IEC 61000-4-30:2008). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 52 p.

10. Ofitsial'naya sait torgovoi marki Jazzway, proizvoditelya svetodiodnogo oborudovaniya [The official website of the brand Jazzway, a manufacturer of LED equipment]. Available at: <https://www.jazz-way.com/> (accessed 29.03.2019).

11. Rozanov Yu.K., Lepanov M.G. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurait Publ., 2018. 206 p. ISBN 978-5-534-05204-6.

12. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

13. GOST 33073–2014. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 33073–2014. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of electric power quality in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 41 p.

14. Ananicheva S.S., Alekssev A.A., Myzin A.L. *Kachestvo elektroenergii: regulirovanie napryazheniya i chastoty v energosistemakh* [Power quality. Voltage and frequency regulation in power systems]. 3rd ed. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2012. 93 p.

15. GOST R 55710–2013. Osveshchenie rabochikh mest vnutri zdaniy. Normy i metody izmerenii [State Standard R 55710–2013. Lighting of indoor work places. Norms and methods of measuring]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

16. GOST R 51317.3.2–2006 (MEK 61000-3-2:2005). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Emissiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16 A (v odnoi faze). Normy i metody ispytaniy [State Standard R 51317.3.2–2006 (IEC 61000-3-2:2005). Electromagnetic compatibility of equipment. Harmonic current emissions (equipment input current [not more] 16 A per phase). Limits and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 23 p.

17. Kartashev I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharol' Yu.V., Vorob'ev A.Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Power quality management]. Moscow, MEI Publ., 2006. 320 p.
18. Kusko, Alexander *Power quality in electrical systems*. New York, McGraw-Hill, 2007 (Russ. ed.: Kusko A., Tompson M. *Kachestvo energii v elektricheskikh setyakh*. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2008. 336 p.).
19. Arrilaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh: per.s angl.* [Harmonics in electrical systems] – M: Energo- atomizdat, 1990.
20. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P. Vliyanie svetodiodnykh istochnikov sveta na spektry tokov i napryazhenii pitayushchei seti [The light-emitting diode light sources influence on the currents spectra and the supply net voltages]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – The Bulletin of KrasGAU*, 2014, no. 3, pp. 195–199.
21. *Ofitsial'nyi sait kompanii OOO "Khomov elektro", proizvoditelya kompensiruyushchikh ustroystv* [Official site of LLC Homov Electro, a manufacturer of compensating devices]. Available at: <http://khomoelectro.ru/articles/aktivnye-i-passivnye-filtry-garmonik-primenenie-problemy-i-tendentsii.html> (accessed 29.03.2019).

Для цитирования:

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

For citation:

Kuzmenko V.P., Solyonyj S.V., Shishlakov V.F., Solyonaya O.Ya. Izmerenie kachestva elektroenergii v sisteme elektrosnabzheniya s svetodiodnymi osvetitel'nymi ustroystvami [Measurement of power quality in the power supply system with LED lightning devices]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 197–212. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212.