



Проблемы массового применения светодиодных ламп в системах освещения жилых и общественных зданий и сооружений

A.E. Епишкин¹, A.A. Костроминов²

¹*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

²*Центр технических курсов AKS*

Аннотация: В статье представлен обзор наиболее актуальных вопросов, возникающих при массовом использовании светодиодных ламп в зданиях и сооружениях. Эта работа предваряет серию статей, посвященных исследованиям в данной области. Рассмотрены особенности эксплуатации применяемых в настоящее время в системах освещения электрических ламп. Показано влияние качества освещения на здоровье людей и воздействие ламп на электрическую сеть. Рассмотрены спектры излучений ламп и их ключевое отличие от естественного солнечного спектра. В статье представлено влияние характера нелинейности нагрузки электрических ламп на качество электропитания сети и её отдельных компонентов. Даны характеристики сроков службы энергосберегающих ламп.

Ключевые слова: освещение, светильники, лампы, спектр освещения, нелинейная нагрузка, гармонические искажения, продолжительность работы, светодиод, автоматический выключатель.

По данным Международного энергетического агентства (IEA) в 2022 году мировое электропотребление составило около 28 000 ТВт·ч, из которых на освещение приходится \sim 3 500–4 000 ТВт·ч (15%). Это включает жилые дома (около 6–10% от общего), коммерческие здания (до 17–40%) и уличное освещение (1–2%). К 2030 году планируется снизить долю потребления освещением до 8% за счет перехода на энергоэффективные осветительные приборы.

Долгое время лампы накаливания являлись лидерами среди всех типов ламп по длительности жизненного цикла и объему применения. В быту они массово использовались вплоть до 2005 года. Их суммарный жизненный цикл составил более 80 лет. Главным недостатком этого массового источника света является его низкая энергоэффективность. Но в ходе научно-технического развития на смену лампам накаливания после 2005 года пришли энергосберегающие лампы на основе газоразрядных источников

света. После 2010 года их постепенно начали вытеснять светодиодные лампы, которые к 2016 году практически полностью захватили нишу осветительных приборов и вытеснили другие виды ламп. В настоящее время множество научных исследований посвящено технологиям совершенствования светодиодных светильников [1, 2].

Во всем мире продажи бытовых светодиодов существенно выросли в последние годы, увеличившись с примерно 5% рынка в 2013 году до около 50% в 2022 году, а интегрированные светодиодные светильники (одна или несколько ламп внутри единицы) составляют растущую долю. Ряд развитых рынков, включая США и Европу, являются ответственными за быстрое расширение рынка светильников, при этом Китай создал существенную внутреннюю и глобальную производственную базу. К 2030 году планируется полная замена технологии освещения на светодиодное.

Несмотря на то, что эти световые технологии известны достаточно давно, их массовое применение стало возможным сравнительно недавно благодаря стремительному развитию миниатюрных импульсных высокочастотных преобразователей напряжений и значительному снижению стоимости их промышленного производства.

Энергосберегающие люминесцентные лампы были на пике популярности около 10 лет, а светодиодные, достигнув такого же срока жизни, пока не собираются уходить со сцены.

Вопрос о целесообразности использования светоизлучающих технологий для обеспечения жизнедеятельности человека, как оказалось, является весьма многофакторным и совершенно не очевидным по значимости этих факторов в принятии решения о выборе технологии светогенерации.

Среди ключевых факторов можно отметить стоимость решения, световая эффективность излучения, энергоэффективность (эксплуатационные затраты на электроэнергию), экологичность производства и жизненный цикл и др.

Несмотря на очевидные преимущества светодиодного освещения с позиции энергоэффективности, вопрос об их массовом использовании является не столь однозначным. Среди ключевых эксплуатационных свойств светодиодного освещения особое место занимают три вопроса:

- 1) влияние спектрального состава света светодиодных светильников на здоровье человека;
- 2) влияние нелинейных искажений преобразователей напряжения для питания светодиодов на электрическую сеть;
- 3) влияние пусковых токов светодиодных светильников на защитные и коммутационные аппараты групповых цепей освещения.

Первые два вопроса получили широкое освещение и пристальное внимание в научно-технических кругах и в здравоохранении. В опубликованном в 2018 финальном отчете европейского научного комитета SCHEER указано [3] что нет прямых доказательств непосредственных неблагоприятных последствий для здоровья, связанных с излучением светодиодов при обычном использовании (современных ламп и дисплеев) среди здорового населения в целом. На сегодняшний день в научной литературе отсутствует достоверная информация о неблагоприятных последствиях для здоровья основного здорового населения в отношении всех длин волн, издаваемых светодиодными устройствами.

Есть доказательства влияния светодиодного освещения на уязвимые и восприимчивые группы населения (пожилых людей и детей). Кроме того, было замечено влияние на циркадный цикл человека синего цвета в диапазоне от 400 нм до 500 нм (рис. 1). В ряде исследований отмечается, что последствием такого воздействия являются: бессонница, усталость,

депрессия, что может в последствии приводить к развитию других заболеваний, включая хронические [5, 6].

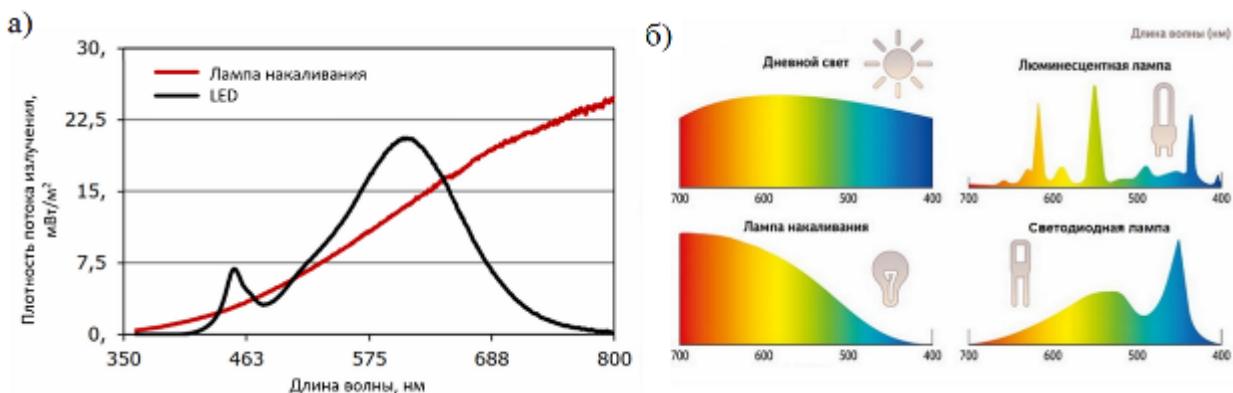


Рис. 1. – а) Сравнение спектра светового излучения лампы накаливания 60Вт и эквивалентной ей по световому потоку LED-лампы [3];
б) Спектры излучений различных типов ламп по данным МФТИ [4]

Тем не менее, в ряде источников поднимается вопрос о рисках излучения в узком диапазоне 440-460 нм для фоторецепторов сетчатки глаза [7, 8].

Некоторые светодиодные светильники представляют потенциальную угрозу для здоровья из-за временной световой модуляции (фликер) на частотах от 100 Гц и выше. Причиной фликера могут быть, как и низкое качество схемотехники самих ламп, так и технология диммирования, которая получила широкое распространение в последнее время (рис. 2). Фликер может вызывать такие симптомы, как головные боли, мигрени и общее недомогание.

Несмотря на общую настороженность к рискам для здоровья, вызванным массовым применением светодиодного освещения, эти риски осознаются научным миром и находятся направления и решения, позволяющие существенно снизить такие риски.

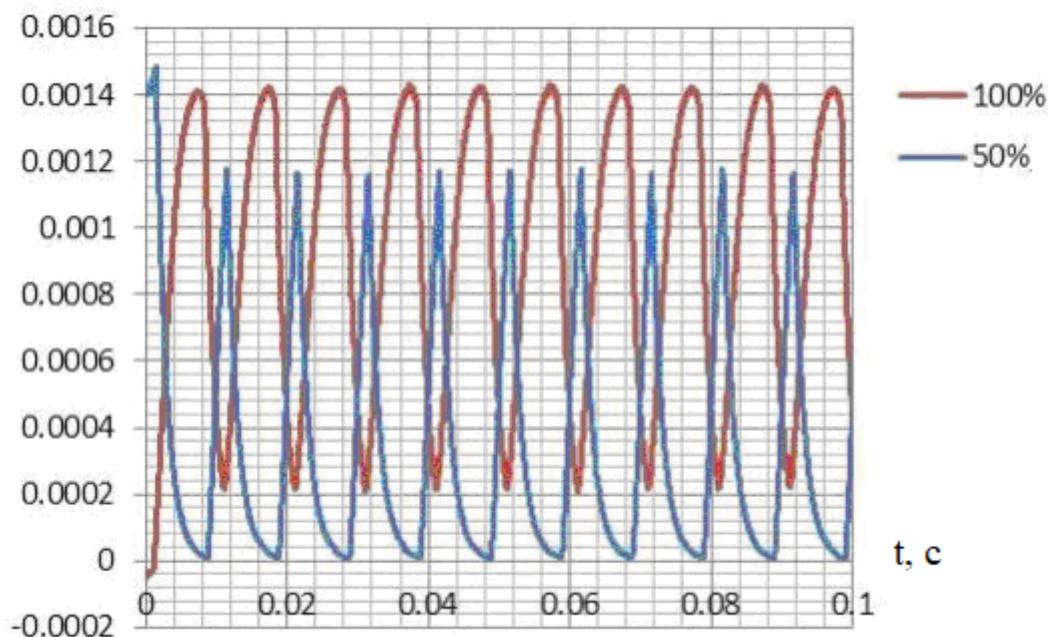


Рис. 2. – Излучение света измерено в условных единицах, как функция времени для LED, работающих на полную (100%) и половинную (50%) мощность при диммировании [4].

Обзор работ на данную тему и решений достаточно полно представлен в ряде научных публикаций [9, 10, 11]. Главным выводом этих работ является то, что продуманы и реализованы технологии, позволяющие если не полностью уйти от указанных проблем, то существенно снизить значимость указанных факторов риска при массовом применении светодиодного освещения. Например, российский патент на изобретение светодиодного источника белого света с комбинируемым удаленным фотолюминесцентным конвектором при условии его реализации мог бы дать существенный толчок к повышению качества светодиодного освещения. Разработка ученых США «циркадно дружественного светодиодного источника света» получила реализацию и дала технологию, которая сильно снизила отрицательные эффекты спектра LED.

Концепция создания полупроводниковых источников белого света с биологически адекватным светом постепенно разрабатывается и внедряется по всему миру. В Японии фирмой Toshiba Material созданы светодиоды по технологии TRI-R. Комбинация фиолетовых кристаллов и люминофоров позволяет синтезировать светодиоды со спектрами, близкими к спектру солнечного света с различной цветовой температурой, и устранить недостатки в спектре традиционного светодиода (синий кристалл, покрытый желтым люминофором). В спектре белого света светодиодов по технологии TRI-R устранен провал на 480 нм и отсутствует избыточная доза синего.

Влияние освещения на здоровье человека, безусловно крайне важно и должно приниматься в расчет при техническом нормировании освещения в проектировании и санитарно-гигиенических целях.

Однако в современном мире влияние нового вида нагрузок на электрические распределительные сети также требует особого пристального внимания.

Одной из самых значимых проблем использования энергосберегающих лам (в основном светодиодных) является проблема нелинейных искажений тока. Хотя мощность отдельной лампы достаточно небольшая, но их количество в системах конечного распределения весьма значительное. Как показывают наблюдения, даже в бытовом электропотреблении влияние нелинейных искажений стало настолько заметным, что не обращать на него внимание становится невозможно (рис. 3). Причем нелинейный характер все чаще выступает в качестве длительной нагрузки (рис. 4). Поэтому этот фактор нелинейности необходимо учитывать по крайней мере на этапе проектирования системы при выборе проводников согласно рекомендациям стандарта ГОСТ Р 50571.5.52.



Рис. 3. – Осциллограммы фазных токов и тока в нейтрали на вводе электропитания на примере загородного дома.

Как показывают наблюдения на объектах загородного строительства последние 5 лет, в современных условиях при вводе мощностей с расчетной мощностью от 30 кВт и выше значение коэффициента нелинейных искажений THDi в среднем держится на уровне 20-40 %. Рационально при выборе длительно допустимого тока проводника принимать именно эти значения в расчетах их пропускной способности по ГОСТ Р 50571.5.52 (приложение Е) при отсутствии достоверных данных о нелинейных искажениях в светильниках со стороны производителей светодиодных ламп.



Рис. 4. – Профиль нагрузки по коэффициенту THDi фазы L1 на интервале 6 дней мониторинга электропитания на вводе в загородный дом.

Стоит помнить, что влияние несинусоидального тока сказывается на температурном режиме кабельной системы из-за дополнительного нагрева нейтрального проводника в составе кабеля токами трехкратных гармоник и проявления скин-эффекта и эффекта близости на токах высших гармоник в фазных проводниках. При необходимости более точного учета влияния гармоник на пропускную способность следует использовать методику, представленную в ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2022.

Из-за частого отсутствия достоверных данных о нелинейных искажениях, которые создают в системе электроснабжения лампы и другие нелинейные нагрузки, задача борьбы с последствиями обычно перекладывается на службы эксплуатации или потребителя. В связи с чем на стадии проектирования целесообразно закладывать в технические решения по учету и распределению электроэнергии средства, позволяющие проводить непрерывный мониторинг электрических процессов в сети и интервальную запись результатов мониторинга.

За последние 20 лет проблема несинусоидальных искажений, вызванных силовой электроникой электропотребителя, обращала на себя

внимание неоднократно. В научных отечественных и зарубежных журналах стали появляться статьи, посвященные этому вопросу [12–16].

Главный акцент в этих исследованиях сделан на эмиссию помех со стороны нелинейных цепей на цифровые системы передачи данных и проблему 3-х кратных гармоник в сетях распределения.

Хотя задача влияния нелинейных искажений на пропускную способность проводника в системах силового электрораспределения очень важная, тем не менее, она не плохо изучена, нормирована и определены средства координации проводника с этим явлением.

Другая задача, которая достаточно слабо отражена в публикациях и почти не рассмотрена нормативно-технической документацией — это воздействие нелинейных искажений тока на электрические аппараты в узлах распределения. В частности, автоматические выключатели, содержащие электромагнитные расцепители и зажимные клеммы аппаратов «туннельного» типа. Электромагнитные расцепители устанавливаются во все автоматические выключатели модульного типа и предназначены для мгновенного разрыва цепи в случае возникновения в ней сверхтоков короткого замыкания. Туннельные клеммы встречаются в устройствах силовой коммутации (контакторы, выключатели нагрузки, автоматические выключатели) на токи до 1600 А.

Токи несинусоидальной формы даже на уровне номинальных могут приводить к значительному перегреву электромагнитных расцепителей. В результате это приводит не только к повреждению электрических аппаратов в узлах распределения, но и, что более существенно, к потере защитных функций автоматического выключателя, что, в свою очередь, приводит к повышению риска пожаров в здании (рис. 5).

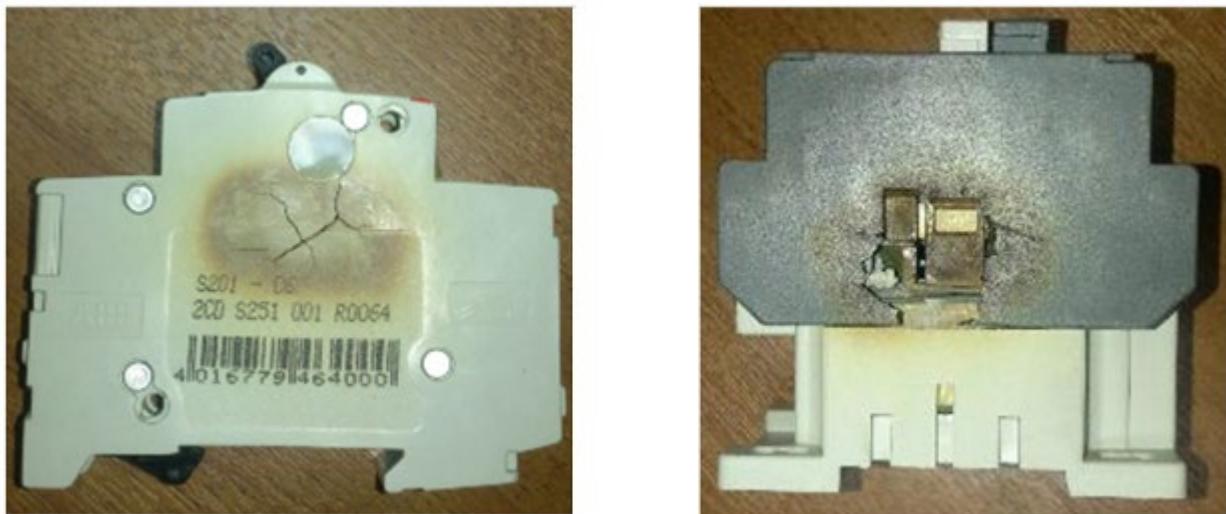


Рис. 5. – Термическое повреждение коммутационных аппаратов
в цепи с нелинейной нагрузкой.

В практике такие ситуации стали встречаться достаточно давно. И нашли отражение в обращении эксплуатации к производителям оборудования с жалобами, что автоматические выключатели, находясь под действием токов, не превышающих номинальные, заметно разогреваются.

Так, например, в щите распределения одной из организаций службой эксплуатации был замечен значительный перегрев модульных автоматических выключателей групп освещения здания. Температура на боковой поверхности аппарата составляла более 86 С°. При этом автоматический выключатель не отключал цепь. Рабочий ток (действующее значение) по замерам был почти в 2 раза меньше номинала. На представленной тепловизионной фотографии видно, что самый значительный нагрев приходится на центральную часть автоматического выключателя, т.е. место установки электромагнитного расцепителя (рис. 6, б).

Наиболее вероятной причиной такой ситуации является разогрев ферромагнитного стального сердечника расцепителя вихревыми токами, вызванными высокочастотными процессами в цепи освещения (рис. 7).

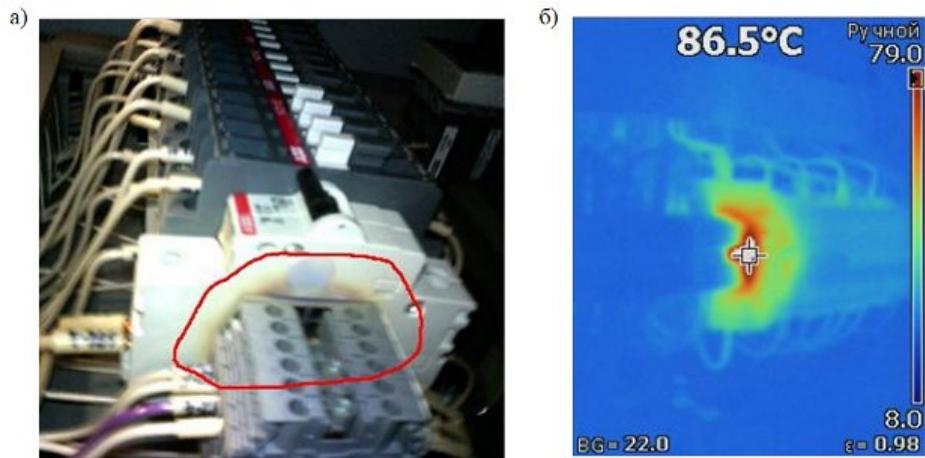


Рис. 6. – Перегрев автоматического выключателя в распределительной сети:
а) общий вид в месте установки выключателя; б) тепловизионная фотография
выключателя.

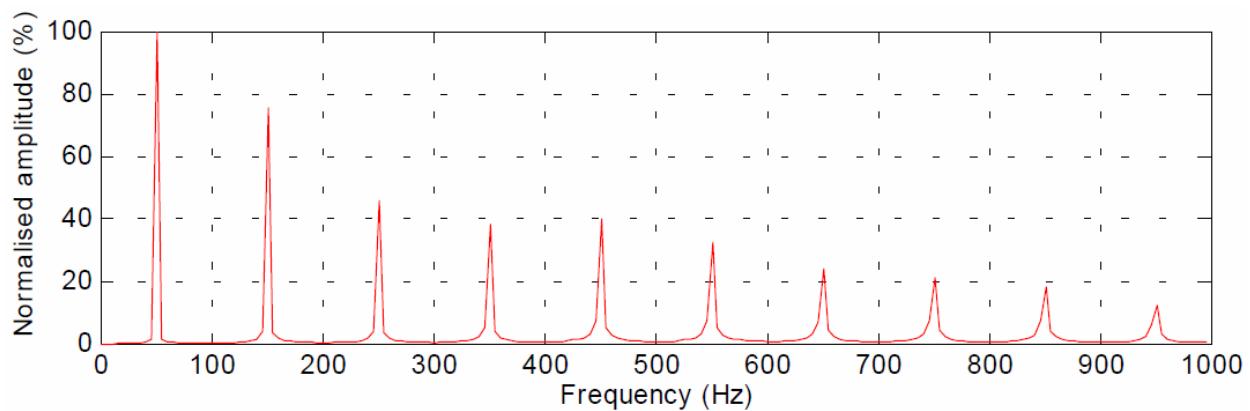


Рис. 7. – Спектральный состав тока в энергосберегающей лампе [13].

При этом сердечник вместе со стальным каркасом крепления катушки представляет собой кольцевой магнитопровод с воздушным зазором (рис. 8).

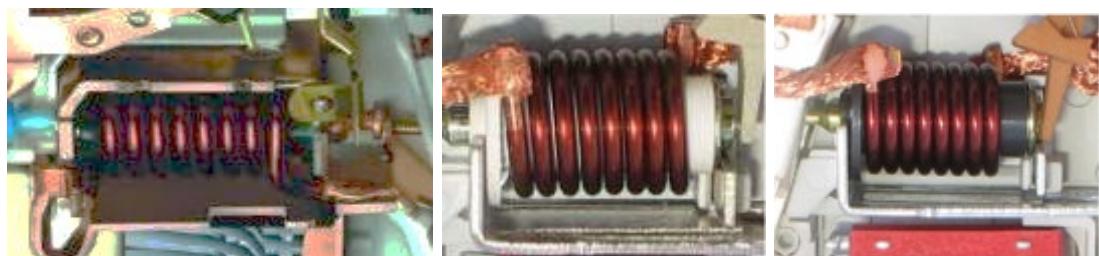


Рис. 8. – Электромагнитные расцепители модульных автоматических
выключателей разных производителей.

Кроме электромагнитной катушки потенциальную опасность с точки зрения перегрева представляют и другие элементы электрических аппаратов, представляющих собой замкнутые ферромагнитные контуры, через которые проходит проводник с током. Таким контуром, например, является зажимная клемма коммутационного аппарата, выполненная из стали (рис. 9).



Рис. 9. – Клеммные зажимы «туннельного типа».

Ферромагнитные свойства материала клеммы усиливают магнитный поток, создаваемый проводником, который зажимает клемма. Этот поток, обладая значительной частотой при несинусоидальных процесса приводит к формированию вихревых токов в металле клеммы.

Проявление такого эффекта также было зафиксировано на одном из предприятий Санкт-Петербурга службой эксплуатации. Замена аппарата на аналогичный с выводами под кабельный наконечник позволило уйти от нагрева клемм.

Надо отметить, что проявление разогрева клемм замечено только в силовых устройствах на большие токи – от 160 А. На модульных выключателях с номинальными токами до 63 А, где такой вид соединения является доминирующим, подобные проявления не были зафиксированы.

Проведенные исследования показали, наличие несинусоидальных искажений в форме тока, проходящего по катушке электромагнитного расцепителя автоматического выключателя (АВ), приводит к значительным повышениям выделения тепловых потерь в его магнитопроводе, превышающим номинальные в 3 и более раза. Эффективным средством борьбы с этим является использование разомкнутого магнитопровода со значительным воздушным зазором не менее 10 мм, что и реализовано на сегодняшний день в АВ некоторых из производителей.

При значительных искажениях стоит рассмотреть вариант отказа от АВ с электромагнитной катушкой мгновенного расцепителя и перейти к использованию плавких предохранителей в качестве средства защиты от сверхтоков.

Также, расчёты показали, что тепловые потери, вызванные протеканием вихревых токов в ферромагнитной замкнутой клемме, составляют примерно 9 Вт при токе 150 А, что почти в 3,5 раз выше номинальных потерь. Чтобы избегать перегрева клемм коммутационных аппаратов на токи от 100 А и выше, следует использовать присоединение кабеля к выводам этих аппаратов без использования замкнутых ферромагнитных контуров. Например, использовать соединение под болт с опрессовыванием жилы кабеля гильзой под болтовое соединение.

Еще одной важной характеристикой ламп, является продолжительность их работы. Поставщики светодиодных ламп не редко завышают эту характеристику и заявляют ресурс 25-50 тысяч часов, что составляет несколько лет. К этой информации нужно относиться осторожно. Отдельный светодиод может гореть десятки тысяч часов в благоприятных для себя условиях: малое количество включений/выключений, температура окружающей среды 20-40 градусов. В энергосберегающих лампах рядом могут работать с десяток светодиодов, подогревающих друг друга. Кроме

того, не редко бывает, что плохо организована система охлаждения внутри конструкции энергосберегающих ламп, особенно бюджетного уровня. Поэтому служба энергосберегающих ламп, как правило, чаще всего заканчивается перегоранием одного светодиода. Исследования показывают, что в первые минуты включения происходит резкий нагрев всех элементов электромеханической системы светодиодной лампы [15]. Нагрев элементов происходит в основном за счет протекания в них электрического тока и выделения энергии источником свет (самим кристаллом). Более всего нагреваются сам источник света и его подложка, элементы печатной платы (драйвера) лампы. Температура всех основных элементов лампы при номинальном режиме через 10—15 мин достигает примерно 90—95 °С. Такая температура является достаточной высокой для системы, что способствует ускоренной деградации кристаллов и других элементов системы и неизбежно приведет к уменьшению яркости и спектра излучения лампы.

Таким образом, характеристика срока службы светодиодной лампы не ограничивается простым выходом её из строя. Чаще светодиоды могут терять свои эксплуатационные свойства постепенно, меняя интенсивность излучения и спектральный состав света по мере эксплуатации в зависимости от количества циклов ее включения и выключения (рис. 10).

Эти свойства деградации светодиодных светильников следует учитывать при прогнозировании амортизации системы освещения на их основе.

По результатам приведенного обзора можно сделать следующие заключения:

1. Светодиодное освещение является важным и перспективным направлением развития технологии эффективной светогенерации.

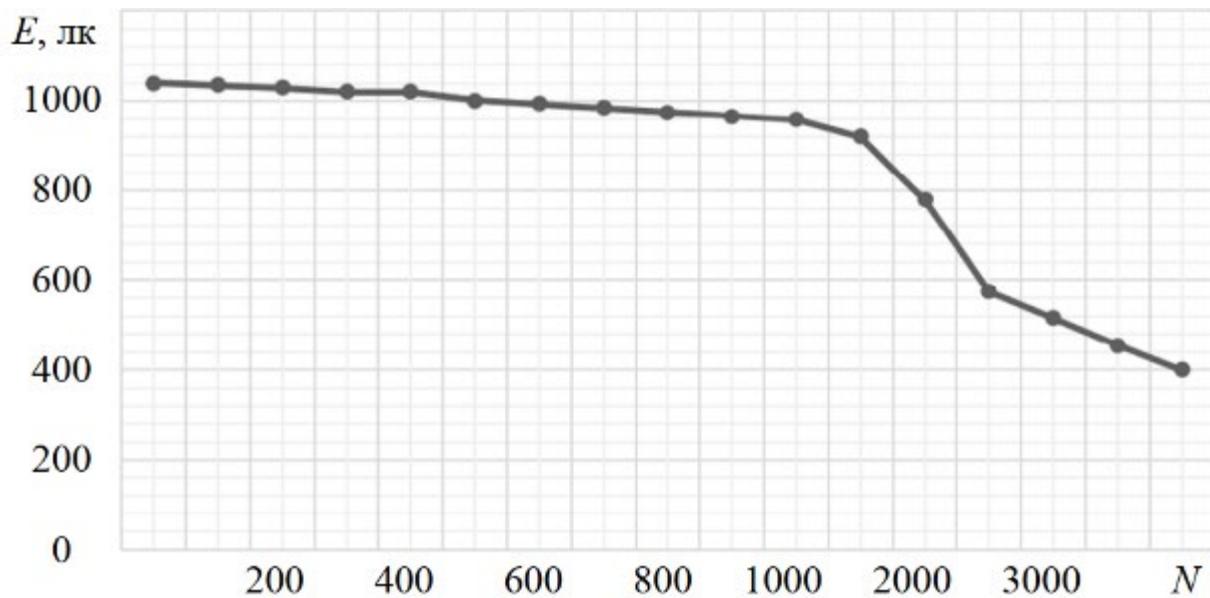


Рис. 10. – График изменения исследуемой светодиодной лампы в зависимости о циклов её включения/выключения нейтрали [16].

2. По состоянию на сегодняшний день отмечаются опасения, что в некоторых случаях светодиодное освещение может создавать риски для здоровья человека. Особенно осторожно следует относиться к выбору светодиодных светильников для детских учреждений и мест пребывания пожилых людей.

3. Следует выбирать для освещения светодиодные лампы белого света, в которых реализована технология защиты от пагубного воздействия синего излучения в наиболее опасном диапазоне 440-460 нм. Например, изготовленных по технологии TRI-R.

4. При выборе средств диммирования освещения, следует выбирать средства и технологии, не создающие фликер на частоте 100 Гц и выше.

5. Светодиодные лампы являются источником значительных нелинейных искажений тока, что должно учитываться при проектировании системы электроснабжения на стадии выбора проводника по пропускной способности. Эти искажения могут приводить к перегреву и выходу из строя

автоматических выключателей из-за разогрева электромагнитной катушки с замкнутым сердечником вихревыми токами и перегреву туннельных клемм в аппаратах на токи от 160 А и выше. Чтобы избавиться от таких последствий следует принимать меры по уменьшению гармонических искажений тока (например, применяя активные фильтры), или повышать стойкость элементов устанавливая такие, которые не чувствительные к высшим гармоникам тока (например, предохранители вместо автоматических выключателей и болтовое крепление проводников с наконечником вместо зажимных туннельных клемм).

6. Следует включать в электроустановку на стадии проекта технические решения по мониторингу качества электропитания с записью результатов измерения для своевременного предупреждения аварийных ситуаций, вызванных нелинейной нагрузкой, включая светодиодные системы освещения.

7. При прогнозировании амортизации светодиодного освещения следует ориентироваться не на заявленные производителем сроки службы ламп, а на результаты исследований по деградации светодиодного светильника, как системы.

Литература

1. Тукшайтов Р.Х., Айхайти И. Разработка и применение критериальных значений параметров светодиодных осветительных приборов для контроля их качества // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4408 (дата обращения: 04.11.2025)
 2. Широбокова Т.А., Шувалова Т.А., Иксанов И.И., Цыркина Т.В., Пономарева С.Я. Методика расчета геометрических параметров светодиодного светильника // Инженерный вестник Дона. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4235 (дата обращения: 04.11.2025).
-

3. Opinion on potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs) // Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) 9th plenary meeting 2018). 92 p.
4. Интернет-сайт производителя ООО «Люмми». URL: lummi.ru/likbez-possvetotekhnike (дата обращения: 23.11.2025)
5. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е., О биологическом эквиваленте излучения светодиодов и традиционных источников света с цветовой температурой 1800-10000 К // Светотехника. 2012. № 3. С. 7-10.
6. Бижак Г., Кобав М.Б. Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина // Светотехника. 2012. № 3. С. 11-16.
7. Зак П.П., Островский М.А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков // Светотехника, 2012. № 3. С. 4-6.
8. Опасность освещения светодиодами // ЭнергоСовет. 2012. № 4 (23). С. 41-42.
9. Дейнего В.Н, Капцов В.А. Свет энергосберегающих и светодиодных ламп и здоровье человека // Гигиена и санитария, 2013. №6. С. 81-84.
10. Капцов В.А., Дейнего В.Н, Сощин Н.П., Уласюк В.Н. Гигиена и спектрально-энергетический паттерн света // Гигиена и санитария, 2017. № 2. С. 101-106.
11. Ming Jin, Xiongfeng Li, Feng Yan, Weixin Chen, Lei Jiang, Xu Zhang. The effects of low-color-temperature dual-primary-color light-emitting diodes on three kinds of retinal cells // Journal of Photochemistry and Photobiol B. Biology. Volume 214, January 2021, 112099. URL.: sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134420305492 (дата обращения: 04.11.2025)

12. Elphick S., Ciufo P., Perera S. The Electrical Performance of Modern Compact Fluorescent Lamps // Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering 7(1):43-51 DOI:10.1080/1448837X.2010.11464256. 7 c.
13. Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Красилов И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. 2002. 6(18). URL: news.elteh.ru/arh/2003/18_19/14.php (дата обращения: 04.11.2025).
14. Topalis F.V., Gonos I.F., Kostic M.B. Effects of changing line voltage on the harmonic current of compact fluorescent lamps // Proceedings of the IASTED International Conference Power and Energy Systems, November 8-10, 1999. Las Vegas. USA. 4 c. URL: users.ntua.gr/igonos/1999/Iasted99_301-144.pdf (дата обращения: 04.11.2025).
15. Петухов В. Энергосберегающие лампы как источник гармоник тока // Новости Электротехники. 2009. №5(59). URL: news.elteh.ru/arh/2009/59/10.php (дата обращения: 04.11.2025).
16. Кузьменко В.П., Шишлаков В.Ф., Солёный С.В., Квас Е.С., Солёная О.А. Исследовательские испытания светодиодных источников света // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. т. 62. № 7. С. 632-640.

References

1. Tukshaitov R.KH., Aykhayti I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ n4y2017/4408 (accessed: 04.11.2025)
2. Shirobokova T.A., Shuvalova T.A., Iksanov I.I., Cyrkina T.V., Ponomareva S.Ya. Shirobokova T. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4235 (accessed: дата обращения: 04.11.2025).
3. Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) 9th plenary meeting 2018). 92 p.

4. Developer's website Lyummi. URL: lummi.ru/likbez-po-svetotekhnike (accessed: 23.11.2025)
5. Aladov A.V., Zakgeym A.L., Mizerov M.N., Chernyakov A.E. Svetotekhnika. 2012. № 3. Pp. 7-10.
6. Bzhak G., Kobav M.B. Svetotekhnika. 2012. № 3. Pp. 11-16.
7. Zak P.P., Ostrovskiy M.A. Svetotekhnika. 2012, № 3. Pp. 4-6.
8. EnergoSovet. 2012. № 4 (23). Pp. 41-42.
9. Deynego V.N, Kaptsov V.A. Gigiya i sanitariya. 2013. № 6. Pp. 81-84.
10. Kaptsov V.A., Deynego V.N, Soshhin N.P., Ulasyuk V.N. Gigiya i spektral'no-energeticheskiy pattern sveta. Gigiya i sanitariya. 2017. № 2. Pp. 101-106.
11. Ming Jin, Xiongfeng Li, Feng Yan, Weixin Chen, Lei Jiang, Xu Zhang. Journal of Photochemistry and Photobiol B. Biology. Volume 214, January 2021, 112099. URL: [sciedirect.com/science/article/pii/S1011134420305492](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134420305492) (accessed: 04.11.2025)
12. Elphick S., Ciufo P., Perera S. Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering 7(1):43-51 DOI:10.1080/1448837X.2010.11464256.
13. Grigor'yev O., Petukhov V., Sokolov V., Krasilov I. Novosti elektrotehniki. 2002. 6(18). URL: news.elteh.ru/arh/2003/18_19/14.php (accessed: 04.11.2025).
14. Topalis F.V., Gonos I.F., Kostic M.B. Proceedings of the IASTED International Conference Power and Energy Systems, November 8-10, 1999, Las Vegas, USA. 4 p. URL: users.ntua.gr/igonos/1999/Iasted99_301-144.pdf (accessed: 04.11.2025).
15. Petukhov V. Novosti Elektrotehniki. 2009. №5 (59). URL: news.elteh.ru/arh/2009/59/10.php (accessed: 04.11.2025).
16. Kuz'menko V.P., Shishlakov V.F., Solyonyj S.V., Kvas E.S., Solyonaya O.A. Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2019. V. 62. № 7. Pp. 632-640.

Дата поступления: 9.11.2025

Дата публикации: 12.12.2025