

UDC 628.9

Kurnosov T.G., Ashryatov A.A. Evaluation of the effectiveness of led lighting fixtures

Оценка эффективности светильников на основе светодиодов

Kurnosov T.G.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"National Research Mordovian State University named after N. P. Ogareva", graduate student

Ashryatov A.A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"National Research Mordovian State University named after N. P. Ogareva", Doctor of Technical
Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Lighting Engineering, Institute of Electronics
and Lighting Engineering

Курносов Т. Г.

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева", аспирант

Ашрятов А. А.

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева", доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
светотехники института электроники и светотехники

Abstract. Today, it is a safe bet that the LED has revolutionised the lighting industry and is rated as the most preferred light source for most lighting applications. However, despite its popularity and widespread industrial application, there is currently no single standardised approach to assessing the efficiency of LED-based luminaires. With this in mind, the article considers issues related to the comparison of light output of LED products and conventional lighting fixtures. Separately considered the evaluation criteria and available test methods to determine the service life of LED systems. Separately outlined the problems of evaluation and the factors that hinder the obtaining of reliable results. On the basis of the obtained results, the requirements to be met by the systems and criteria for assessing the efficiency of luminaires based on LEDs are formulated.

Keywords: LED, evaluation, efficiency, design, module, criteria, driver, optics, lighting fixtures.

Аннотация. На сегодняшний день уверенно можно утверждать тот факт, что светодиод кардинальным образом изменил индустрию освещения и оценивается как наиболее предпочтительный источник света для большинства осветительных приложений. Однако несмотря на свою популярность и широкое промышленное приложение, в настоящее время отсутствует единый стандартизированный подход к оценке эффективности светильников на основе светодиодов. С учетом отмеченного, в статье рассмотрены вопросы, касающиеся сравнения световой отдачи светодиодных изделий и обычных осветительных приборов. Отдельно рассмотрены критерии оценки и доступные методы проведения испытаний, позволяющие определить срок службы светодиодных систем. Также обозначены проблемы проведения анализа и факторы, препятствующие получению достоверных результатов. Систематизируя рассмотренный материал, сформулированы требования, которым должны отвечать системы и критерии оценки эффективности светильников на основе светодиодов.

Ключевые слова: светодиод, оценка, эффективность, дизайн, модуль, критерии, драйвер, оптика.

В последние годы наблюдается значительный рост использования светильников на основе светодиодов. Светодиодное освещение является одной из самых популярных

технологий современной эпохи благодаря своим изменчивым физическим конструкциям, низкому энергопотреблению и очень высокой надежности по сравнению с другими традиционными решениями в области освещения. Соответствующее применение светодиодных источников света может предложить измеримое улучшение функций и производительности, по сравнению с традиционными осветительными приборами, и это вместе с их долговечностью и связанными с этим относительными долгосрочными преимуществами в стоимости [1].

На сегодняшний день, эксперты отмечают, что во всем мире около 1/3-1/2 коммерческих, промышленных и наружных светильников используют светодиодные модули. Потенциальная экономия электроэнергии при использовании светодиодов превышает 50%, что в сочетании с длительным сроком их службы значительно снижает затраты на эксплуатацию и обслуживание [2]. Это делает срок окупаемости светодиодов коротким, а проекты освещения более склонными к выбору этой экологически безопасной технологии. В отчете Международного энергетического агентства за 2024 год, описывающем прогресс на пути к будущему сценарию устойчивого развития, отмечено, что за последние годы глобальное использование светодиодов увеличивается стремительными темпами. С доли рынка в 5% в 2013 году показатель возрос почти до половины мировых продаж осветительных приборов в 2024 году, причем встроенные светодиодные светильники занимают значительную часть рынка светодиодов. Ожидается, что в скором будущем рынок светодиодов поглотит полностью сегмент компактных люминесцентных ламп и люминесцентных ламп с холодным катодом.

При этом прогнозируется, что объем рынка светодиодного освещения вырастет с 79,59 млрд долларов США в 2024 году до 239,6 млрд долларов США к 2035 году, что соответствует среднегодовому темпу роста в 10,53% в прогнозируемый период 2024–2035 годов [3] (см. рис. 1).

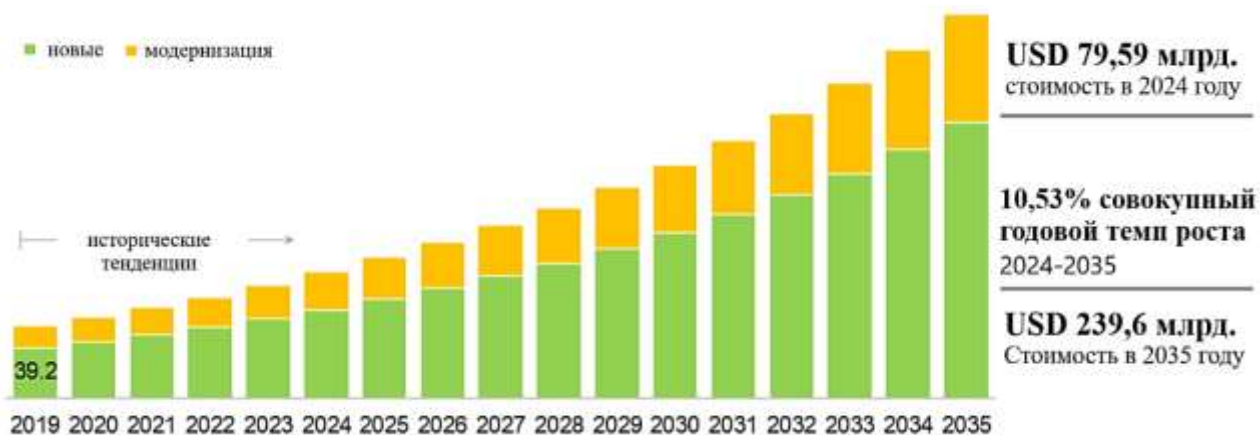


Рис. 1 Мировой рынок светодиодного освещения
по типу установок, млрд. дол. [3]

Статистические данные свидетельствуют о том, что за последние несколько лет развитие рынка светодиодного освещения происходило гораздо быстрее, чем предсказывали исследования. В тоже время, после широкого распространения светодиодов, определение характеристик светильников стало более сложным по сравнению с традиционными источниками света. Понимание и сравнение технических параметров светодиодов ошибочно кажется простым делом: достаточно ознакомиться с техническим паспортом, сравнить показатели светоотдачи, эффективности люменов и на основании этого сделать вывод. Однако, любое решение о покупке или проектировании, основанное только на верхних цифрах - спецификациях на первых страницах - без анализа того, как светодиоды будут работать в реальных условиях эксплуатации, может привести к неудовлетворительным результатам и значительным бизнес-рискам.

Отсутствие универсальных регламентов, стандартов и норм, позволяющих измерять или сравнивать характеристики светодиодных светильников, влечет за собой неопределенность. Ситуация усугубляется тем, что на рынке присутствуют новые и непроверенные компании, некоторые из которых делают сомнительные заявления о производительности своей продукции.

Таким образом, принимая во внимание тот факт, что в сфере оценки производительности не существует единого мнения и согласованных норм, а анализ качества используемых светодиодов и их эффективности как системы имеет важное значение для понимания долгосрочных эксплуатационных характеристик в течение всего срока службы, более детальное изучение данных вопросов представляет собой актуальную и важную научно-практическую задачу, что и предопределило выбор темы данной статьи.

Результаты ряда высоко ускоренных испытаний светодиодных светильников на деградацию при различных уровнях температуры и влажности представлены в публикациях Jun Wang, Tian Wang [4], Masashi Miyakawa, Hiroshi Tsuji [5].

Вопросы, связанные с деградацией светового потока из-за безизлучательной рекомбинации в эпитаксиальных дефектах и изменения электрических параметров вследствие увеличения токов утечки, в результате чего срок службы и производительность светодиодов ограничиваются наличием дефектов в структуре эпитаксиального слоя, описывают в своих публикациях Фролова И.В., Радаева О.А., Сергеев В.А. [6], Курносов Т.Г., Ашрятов А.А. [7].

В работах Шамшиддинова М.К. [8], Иванова А.М. и Клочкова А.В. [9] рассматриваются критерии отказа светодиодных светильников, такие как снижение светового потока (например, до уровня L70) и изменение цветовых характеристик, включая смещение цветовой температуры и ухудшение индекса цветопередачи, как показатели, ограничивающие срок службы.

Анализ публикаций по теме исследования показывает, что вопросы связанные с оценкой производительности и эффективности светодиодного освещения ученые рассматривают с разных точек зрения, однако ряд проблемных моментов не нашел своего должного освещения в научно-экспертной литературе. Так, в дальнейшем развитии нуждаются методы и подходы моделирования изменения характеристик светодиодных ламп в течение срока службы с учётом нескольких управляющих показателей. Отдельного внимания заслуживает анализ деградации светодиодного светильника, включая светодиодный драйвер в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении подходов к оценке эффективности светильников на основе светодиодов.

Эффективность светодиода можно охарактеризовать различными способами, но в большинстве случаев она устанавливается несколькими факторами, которые на практике становятся кумулятивными в своих положительных или отрицательных аспектах [4]. Сравнение светоотдачи и срока службы наиболее эффективных светодиодных осветительных приборов и традиционных источников света представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение световой отдачи лучших в своем классе светодиодных изделий и обычных осветительных приборов

Светодиодные продукты		
Тип/марка	Световая отдача (лм/Вт)	Срок службы (L70) (ч)
Светодиодная лампа A19 (с регулировкой яркости, 2700 К)	100	25,000
Светодиодная лампа PAR38 (3000 К)	88	25,000
Светодиодная трубка T8 (4000 К)	149	50,000
Светодиодный светильник 6" (3000 К)	86	50,000
Светодиодный плафон 2' Ч 4' (3500 К)	129	50,000
Светодиодный светильник высокого/низкого уровня (4000 К)	136	60,000
Светодиодный уличный светильник (5000 К)	118	60,000
Традиционные осветительные приборы		
Тип/марка	Световая отдача (лм/Вт)	Срок службы (ч)
Лампы накаливания	15	1,000
Галогенная лампа	20	8,400
Люминесцентная лампа	70	12,000
Люминесцентная лампа с возможностью регулировки яркости	70	12,000
Линейная люминесцентная система	108	25,000
Высокоинтенсивная газоразрядная лампа (многоваттная)	115	15,000
Высокоинтенсивная газоразрядная лампа (маломощная)	104	15,000

Итак, согласно рекомендациям международных организаций по стандартизации и качеству для оценки эффективности светильников на основе светодиодов и определения того, в течение какого периода времени они будут поддерживать свои номинальные характеристики, необходимо оценить как «начальные», так и «временные» параметры [5, 6] (см. рис. 2).

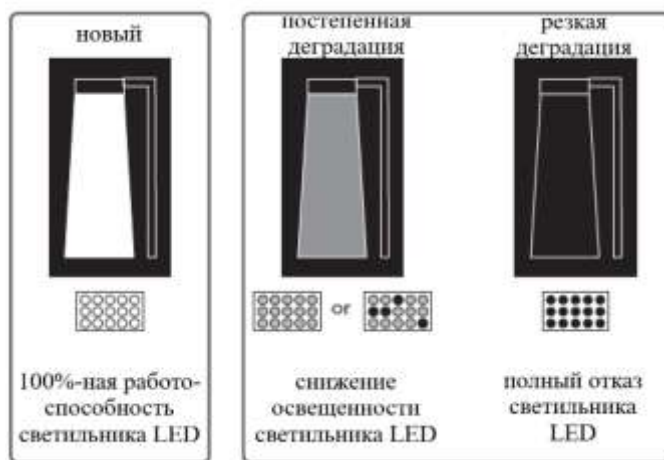


Рис. 2 Оценка «начальных» и «полезных эксплуатационных характеристик»

светильников на основе светодиодов

Постепенная деградация светового потока приводит к снижению освещённости на обслуживаемой поверхности. В данном случае в ходе оценки имеет значение, какая часть первоначального светового потока источников света в светильнике доступна через определенный период времени. Снижение светового потока может быть обусловлено деградацией отдельных светодиодов, излучающих меньше света, а также выходом из строя некоторых светодиодов, полностью прекративших излучение [7].

Резкая деградация светового потока описывает ситуацию, при которой светильник на основе светодиодов полностью прекращает излучение из-за отказа всей системы или её критического компонента.

Оценка долговечности светодиодных светильников осуществляется с использованием стандартных показателей, таких как уровень поддержания светового потока (например, L70, L80) и номинальный срок службы [8].

Одним из основных международных стандартов производительности светодиодных светильников для общего освещения является IEC 62722-2-1 «Luminaire performance – Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires». В России действует гармонизированный ГОСТ IEC 62722-2-1-2017 «Светильники. Часть 2-1. Частные требования к характеристикам для светильников со светодиодными модулями» [9]. Предложенный в стандарте метод испытаний предусматривает минимальное время тестирования 6000 часов, при этом световой поток регистрируется каждые 1000 часов.

Основные ключевые характеристики, изложенные в стандарте IEC 62722-2-1, с ориентацией на которые следует определять производительность и эффективность светодиодных светильников, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Критерии эффективности, согласно стандарту IEC 62722-2-1

Термин	Единица	Краткое описание
Потребляемая мощность	W	Потребляемая электрическая мощность, включая работу необходимых компонентов
Восстановленный световой поток	lm	Освещённость, учитывающая спектральную чувствительность человеческого глаза, определяется путем взвешивания мощности излучения на каждой длине волны в соответствии с характеристиками, заданными стандартом «фотометрический наблюдатель CIE»
Номинальная световая эффективность	lm/W	Отношение светового потока светильника к потребляемой электрической мощности
Распределение номинальной силы света	cd или cd·klm ⁻¹	Табличные или графические данные, указывающие на пространственное распределение и интенсивность излучаемого света

Термин	Единица	Краткое описание
Номинальные значения координат цветности, как исходные, так и поддерживаемые		Цвет с точки зрения оттенка и насыщенности на двумерной диаграмме цветности CIE
Номинальный медианный срок службы, L_x (альтернативное обозначение L_xBy)	час	Время, в течение которого 50% светодиодных модулей не обеспечивают хотя бы процент x от начального светового потока
Номинальное значение резкого отказа	%	Процент светильников на основе светодиодов, которые не работают в течение среднего срока службы
Номинальная коррелированная цветовая температура	К	Стандартизованный показатель оттенка света, характеризующий его теплоту или холодность.
Номинальный индекс цветопередачи (CRI)	0-100	Измерение способности воспроизводить цвета по сравнению с идеальным или «естественным» источником света (обычно 80+).
Номинальная температура окружающей среды, связанная с производительностью светильника	°C	Самая высокая температура окружающей среды вокруг светильника, связанная с номинальной производительностью светильника при нормальных условиях эксплуатации

В настоящее время оценка эффективности светодиодной продукции является сложной задачей. Это объясняется двумя основными причинами:

1. Разные производители используют различные технические определения для описания характеристик своих продуктов, что затрудняет их сравнение.
2. Технический дизайн продукта может иметь огромное значение с точки зрения производительности. Даже если два светильника построены на совершенно одинаковых светодиодах, их характеристики могут сильно отличаться из-за выбранного дизайна.

Например, если сравнить эффективность (выраженную в люменах на ватт) на рис. 3, то очевидным является тот факт, что дизайн продукта может иметь большое значение для системной производительности светильника. Эффективность управления тепловыделением, драйвер и оптика способны повлиять на эффективность всего светильника на основе светодиодов.





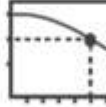
Свето-диодный чип	Тепловая конструкция		Драйвер		Оптика		Световой поток обслуживание при 5000 ч	Эффективность после 2 лет
								
160 лм/Вт	95%	152 лм/Вт	90%	137 лм/Вт	85%	116 лм/Вт	98%	114 лм/Вт
160 лм/Вт	85%	136 лм/Вт	70%	95 лм/Вт	50%	48 лм/Вт	60%	29 лм/Вт

Рис. 3 Влияние выбора дизайна на производительность

Следует отметить, что помимо критериев в процессе оценки эффективности LED немаловажную роль играет выбор рациональных и действенных методов оценки. В данном контексте внимания заслуживает тот факт, что до 2007 года учеными и экспертами разрабатывались оценки отдельных компонентов светодиодных приборов, таких как корпус, вторичная просвечивающая оптика и драйверы [10]. Примерно с 2008 года исследовательский интерес был расширен до изучения аспектов надежности и срока службы светодиодных систем как единого комплекса для определения режимов отказов на уровне системы, частоты отказов отдельных элементов и наиболее часто встречающихся механизмов отказов. Преимуществом данного подхода является то, что комплексный анализ, предусмотренный в его рамках, позволяет оценивать взаимодействие между отдельными компонентами, которое в противном случае не учитывается, но, тем не менее, имеет решающее значение для определения общей надежности системы.

Модель, представленная в уравнении, отражает влияние деградации оптических материалов на поддержание светового потока для светодиодного устройства:

$$E_{tot}(t) = E_{init} F_{LEDs} [L(t)]^m [R(t)]^n$$

где $E_{tot}(t)$ - общий световой поток от светильника в момент времени t ;

E_{init} - начальный световой поток от светильника в нулевой момент времени.;

F_{LEDs} - коэффициент поддержания светового потока светодиода в момент времени t ;

$L(t)$ - изменение нормированного коэффициента пропускания линзы в момент

времени t ;

m - коэффициент, зависящий от конструкции линзы, определенный в результате моделирования;

$R(t)$ -изменение нормированного отражающего коэффициента отражателя в момент времени t ;

n - коэффициент, зависящий от конструкции отражателя, определенный в результате моделирования.

По мере появления на рынке светодиодной продукции потребность в методах тестирования надежности и срока службы на уровне системы первоначально восполнялась методами, которые производители исторически использовали для других электронных систем, включая:

- ускоренное ресурсное тестирование;
- высокоскоростное испытание на долговечность;
- испытания на ускоренную деградацию при ступенчатом напряжении.

Систематизируя представленную выше информацию, сформулируем требования, которым должны отвечать системы и критерии оценки эффективности светильников на основе светодиодов.

1. Возможность тестировать изделия как систему, не нарушая целостности оцениваемых образцов, и в условиях, включающих стрессовые факторы, присутствующие в предполагаемом применении, такие как: окружающая среда, (температура, относительная влажность), модель использования.

2. Учитывать различные режима отказа:

- параметрический, основанный на:
 - сохранении яркости;
 - сдвиге цветности;
- катастрофический, учитывающий:
 - полный отказ (например, образцы не дают никакого светового потока или дают резко низкий поток);
 - поведение в конце срока службы (например, прерывистая работа, циклическое включение-выключение, мерцание).

3. Используемые методы и подходы должны быть прогнозируемыми:

- испытания должны включать не менее трех условий, охватывающих диапазон возможных условий применения, чтобы обеспечить интерполяцию, или одно испытание для наихудшего сценария;

- оценка срока службы должна основываться на более коротких прогнозах, сделанных для параметрических и катастрофических режимов отказа.

4. Срок проведения оценки и испытаний должен быть как можно более коротким (т.е. ускоренным). Судя по откликам представителей отрасли, испытания продолжительностью более 6 000 часов нецелесообразны в связи с быстрым циклом развития рынка новых и существующих продуктов.

Резюмируя результаты проведенного исследования, можно отметить, что за последние несколько лет произошли существенные изменения в светотехнической отрасли. На рынке появился широкий спектр светодиодных светильников по доступной цене, что в свою очередь усложнило оценку их эффективности и производительности. Проведенный в статье анализ свидетельствует о том, что для поддержания высококачественного освещения крайне важно, чтобы проектировщики и специалисты по спецификациям имели в своем распоряжении соответствующие стандартизированные и доступные показатели, которые позволили бы обеспечить выбор и правильное применение надежной продукции.

References

1. Курносков Т.Г., Ашрятов А.А. Анализ проблем и ограничений существующих систем освещения // Полупроводниковая светотехника. – 2024. №3-4 (86) С. 6-8.
2. Железникова О.Е., Бленцов И.В., Микаева С.А. Оценка эффективности освещения светодиодами // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78. № 6. С. 251-257.
3. Liang Zhang, Runan Zhang Investigating Driving Current and Environmental Conditions on Micro-LED Performance Metrics // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2024. Volume 55, Issue S1. P. 87-93.
4. Jun Wang, Tian Wang Numerical Investigation on the Performance Enhancement of InGaN/GaN Light-Emitting Diodes with a Novel p-i-n Electron-Blocking Layer // International Journal of Optics. 2024. Volume 2024, Issue 1. P. 20-29.
5. Masashi Miyakawa, Hiroshi Tsuji Highly Stretchable LED Display Using Liquid Metal and Molybdenum-Barriered Multilayer Electrodes with Long-Term Reliability // Advanced Electronic Materials. 2024. № 98. P. 187-194.
6. Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А. Диагностический контроль качества светодиодов по динамическим параметрам электролюминесценции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 2. С. 142-144.