

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА СВЕТО-ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATHCAD

Светодиодные устройства с импульсным режимом работы находят все более широкое применение в светотехнике – стробоскопы, прожекторы, светофоры, датчики охранных систем, импульсные осветители и т. д. Импульсное питание позволяет снизить нагрев в области р-п перехода светодиода, повысить эффективность и срок службы светотехнического устройства.

Предложена методика определения энергетических и оптических характеристик макета светотехнического устройства на базе светодиодов при импульсном возбуждении с использованием программной среды Mathcad, позволяющая определять величину потребляемой мощности макетом, мощность излучения и его энергетическую эффективность.

Представлены результаты определения энергетических и оптических параметров, предложенным методом, макета светотехнического устройства, изготовленного на основе холодно-белого мощного светодиода Led ARPL-3W. Показано, что максимальные значения эффективности при импульсном возбуждении и непрерывном питании для макета составили порядка 40%. Разница в значениях эффективности при потребляемой мощности (номинальный режим) при непрерывном питании и импульсном возбуждении с коэффициентом заполнения 50% составляет порядка 5%. В диапазоне потребляемых мощностей до 0,02 Вт эффективность макета светотехнического устройства практически не зависит от температуры активной области кристалла. Форма питающего импульса влияет на энергетическую эффективность макета светотехнического устройства. При возбуждении холодно-белых светодиодов импульсами треугольной, трапециевидной форм эффективность ниже, чем при прямоугольной форме импульсного возбуждения. Исследованные мощностные характеристики показали значительное влияние длительности импульса накачки для токов превышающих 2 А на эффективность излучательной рекомбинации. Увеличение частоты питающего тока приводит к снижению эффективности кристалла при одинаковых длительности и мощности возбуждающего импульса.

**Ключевые слова:** светодиод, импульсное возбуждение, средняя мощность излучения, энергетическая эффективность.

Необходимость измерения энергетических и оптических характеристик источников излучения, продиктована стремительным развитием светодиодных источников света и проектированием энергоэффективных светотехнических устройств на их основе. Светодиоды в импульсном режиме работы нашли своё применение в стробоскопах, прожекторах, светофорах, датчиках охранных систем, импульсных осветителях и т. д.

Авторами [1] проведены относительные измерения средней мощности излучения светодиода при импульсном возбуждении и питании постоянным током, которая оценивалась по сопротивлению фоторезистора регистрирующего излучение без учёта углового распределения светового потока, температурного режима светодиода и фоторезистора, соответствия спектров излучения источника спектральной чувствительности приёмника излучения. Результаты таких измерений привели к ошибочному заключению о линейной зависимости сопротивления фоторезистора от потребляемой

мощности светодиодом прямо пропорциональной мощности излучения.

В работе [2] определены зависимости светоотдачи от прямого и пульсирующего тока с частотой переключений в диапазоне от постоянного тока до 10 МГц. Где разработаны рекомендации по эксплуатации светодиодов при больших значениях прямого тока через р-п – переход.

Определение КПД светодиодов [3] выполнены методом одновременного сравнения, где сопоставлены нормы разности двух кривых напряжения на светодиоде, получаемых при изменении сопротивления проводника от воздействия импульсного тока положительной и отрицательной полярности. Однако данная методика позволяет определять КПД только при определенном соотношении сигнал-шум на участках остывания полупроводника.

В работе [4], [5] представлены результаты исследования зависимости мощности излучения от плотности тока у светодиодов на основе гетероструктур InGaN и AlGaInP в импульсном

режиме, исключая нагрев активной области кристалла. Измерения мощности излучения осуществлялись в конце импульса тока длительностью 1 и 10 мкс при частоте повторения 1кГц и 100 Гц. Однако эти измерения проводились для малых токов и мощностей при допущении отсутствия разогрева активной области.

Исследование тепловых процессов, происходящих при питании светодиодов импульсным током, и влияние этих процессов на светотехнические и электротехнические характеристики приведены в работе [6]. Автор утверждает, что увеличение частоты питающего тока приводит к снижению нагрева активной области кристалла при равных скважностях.

Целью данной работы является определение энергетических и оптических характеристик макета светотехнического устройства при импульсном возбуждении в широком диапазоне потребляемых мощностей.

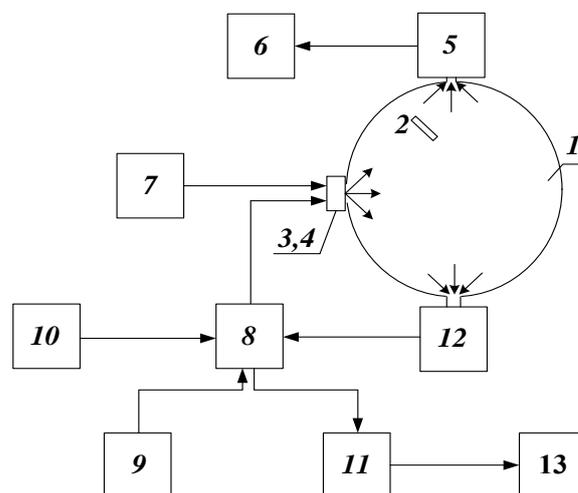
Измерение энергетических параметров макета светотехнического устройства (МСУ) на базе холодно-белых светодиодов, проводились методом «Интегрирующей сферы» на испытательном фотометрическом стенде, изображённом на рисунке 1, с использованием фотометрического шара (1), имеющего достаточно большой диаметр, покрытого изнутри BaSO<sub>4</sub>, рассеивающего свет в соответствии с законом Ламберта. Этот метод позволяет проводить измерения светового потока источника с произвольным распределением излучения в окружающем пространстве на порядки быстрее, чем гониометрический метод [7], [8]. Мощность излучения МСУ прямо пропорциональна освещённости интегрирующей сферы с учётом её коэффициента [9].

Световой поток исследуемого МСУ (3), сравнивался со световым потоком эталонного Led (4), поверенного при использовании калиброванного спектрорадиометрического комплекса с интегрирующей сферой DTF-320-201 [10].

Косвенные измерения светового потока проводились калиброванным люксметром «ТКА-Люкс» (5,6) в диапазоне 0-200000Лк.

В качестве импульсного источника питания был использован генератор Rigol DG 4062 (10), позволяю-

щий изменять коэффициент заполнения (от 1 до 95%) и форму импульса. Световой импульс измерялся фотодиодом ФД-7К (12) в режиме преобразователя светового потока в ток. Для увеличения диапазона потребляемой мощности МСУ при измерениях использован повторитель (8) (рис. 2), выполненный на базе транзистора КТ819Г, а также токоограничивающее сопро-



1 – интегрирующая сфера; 2 – экран;  
3 – исследуемый макет светотехнического устройства (МСУ), изготовленный на основе мощного светодиода Led ARPL-3W; 4 – эталонный светодиод с радиатором; 5 – фотометрическая головка люксметра «ТКА-Люкс»; 6 – блок обработки сигналов люксметра «ТКА-Люкс»; 7 – блок стабилизации заданного температурного режима МСУ; 8 – коммутационное устройство с повторителем напряжения; 9 – источник постоянного тока; 10 – генератора Rigol DG 4062; 11 – осциллограф Rigol DS 2072; 12 – фотодиод ФД-7К; 13 – персональный компьютер (ПК).

Рисунок 1. Структурная схема испытательного фотометрического стенда

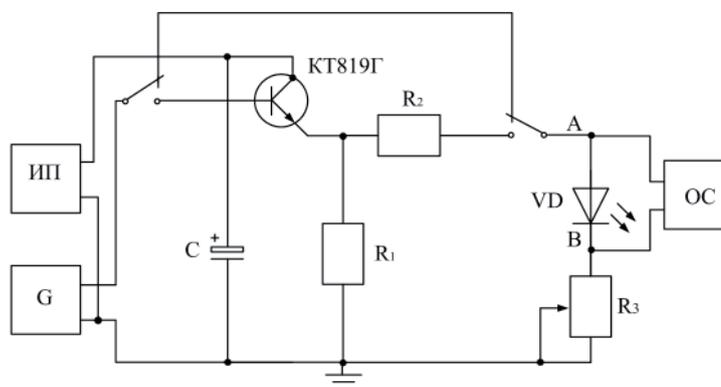


Рисунок 2. Блок схема измерительной части установки

тивление R3. Величина сопротивления изменялась от 0,075 до 1000 Ом.

Измерение параметров импульсов проводилось с использованием цифрового осциллографа Rigol DS 2072 (11) (OC), с дискретизацией – 7000 точек на осциллограмму (период). Для уменьшения погрешностей вызванных шумом сигналов использовано усреднение по 8000 осциллограмм.

Эффективные значения тока и напряжения были определены как среднееквадратичное значение на периоде повторения [11]:

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{T_{\Pi}} i^2 dt} = i \sqrt{\frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{t_{\text{imp}}} dt} = i \sqrt{\frac{t_{\text{imp}}}{T_{\Pi}}} \quad (1)$$

и

$$U_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{T_{\Pi}} u^2 dt} = u \sqrt{\frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{t_{\text{imp}}} dt} = u \sqrt{\frac{t_{\text{imp}}}{T_{\Pi}}}, \quad (2)$$

где  $T_{\Pi}$  – период повторения;  $t_{\text{imp}}$  – длительность импульса тока (напряжения);  $u$  и  $i$  средние значения амплитуд импульсов напряжения и тока.

Исходя из этого, потребляемая мощность МСУ при импульсном напряжении прямоугольной (трапециoidalной) формы определится по формуле [12]:

$$P = U_{\text{эф}} \cdot I_{\text{эф}} = u \cdot i \cdot \frac{t_{\text{imp}}}{T_{\Pi}}, \quad (3)$$

а при треугольной форме напряжения:

$$P = U_{\text{эф}} \cdot I_{\text{эф}} = \frac{u \cdot i}{3}. \quad (4)$$

Потребляемая мощность МСУ и параметры световых импульсов определялись в программной среде Mathcad 15 [13]. После чтения данных из осциллографа и присвоения им необходимых переменных, с помощью организации вложенных циклов определялись длительность периода импульсов напряжения и тока, длительности самих импульсов, коэффициент заполнения [14]. Алгоритм работы программы изображён на рисунке 3. Исходными данными для алгоритма являются количество точек измерения и значения в точках измерения. Завершающими операциями алгоритма являются расчёт мощности потребляемой МСУ по определенным эффективным значениям тока и напряжения.

Предлагаемая методика позволяет определять энергетические и оптические характери-

стики МСУ в широком диапазоне частот следования импульсов, скважности, для различной формы и при различных температурах подложки светодиодов.

Основные параметры возбуждения МСУ импульсами прямоугольной формы с частотой следования 1 кГц и скважностью 5 представлены в табл. 1.

Как видно из рис. 4, максимальные значения эффективности при импульсном возбуждении и непрерывной форме сигнала МСУ составляют порядка 40%. Разница в значениях эффективности при потребляемой мощности 3Вт (номинальный режим) при непрерывном сигнале и импульсном возбуждении с коэффициентом заполнения 50% составляет порядка 5%. Форма питающего импульса влияет на энергетическую эффективность МСУ. Так при возбуждении импульсами треугольной, трапециoidalной форм эффективность ниже, чем при прямоугольной форме.

Получены зависимости эффективности макета от температуры в диапазоне малых потребляемых мощностей. Из сравнения кривых рис. 5 следует, что в диапазоне потребляемых мощностей до 0,02 Вт эффективность МСУ практически не зависит от режима теплоотвода. При потребляемой мощности более 0,025 Вт дифференциальная эффективность МСУ, определяемая наклоном кривой  $\eta(P)$  уменьшается с ростом мощности тем сильнее, чем хуже теплоотвод.

На рис. 6 представлены зависимости оптической мощности от силы импульсного тока для различных коэффициентов заполнения при фиксированной частоте повторения и температурном режиме. Приведенные мощностные характеристики показывают значительное влияние длительности импульса накачки для токов превышающих 2 А на эффективность излучательной рекомбинации и тем самым, на выходную оптическую мощность МСУ.

Измерение зависимости мощности излучения от частоты импульсов при одинаковой потребляемой в импульсе мощности порядка 10 Вт и длительности 50 мкс (рис. 7) показали, что эффективность падает с ростом частоты. Причём при фиксированных частотах мощность излучения пропорциональна коэффициенту заполнения для данного диапазона частот.

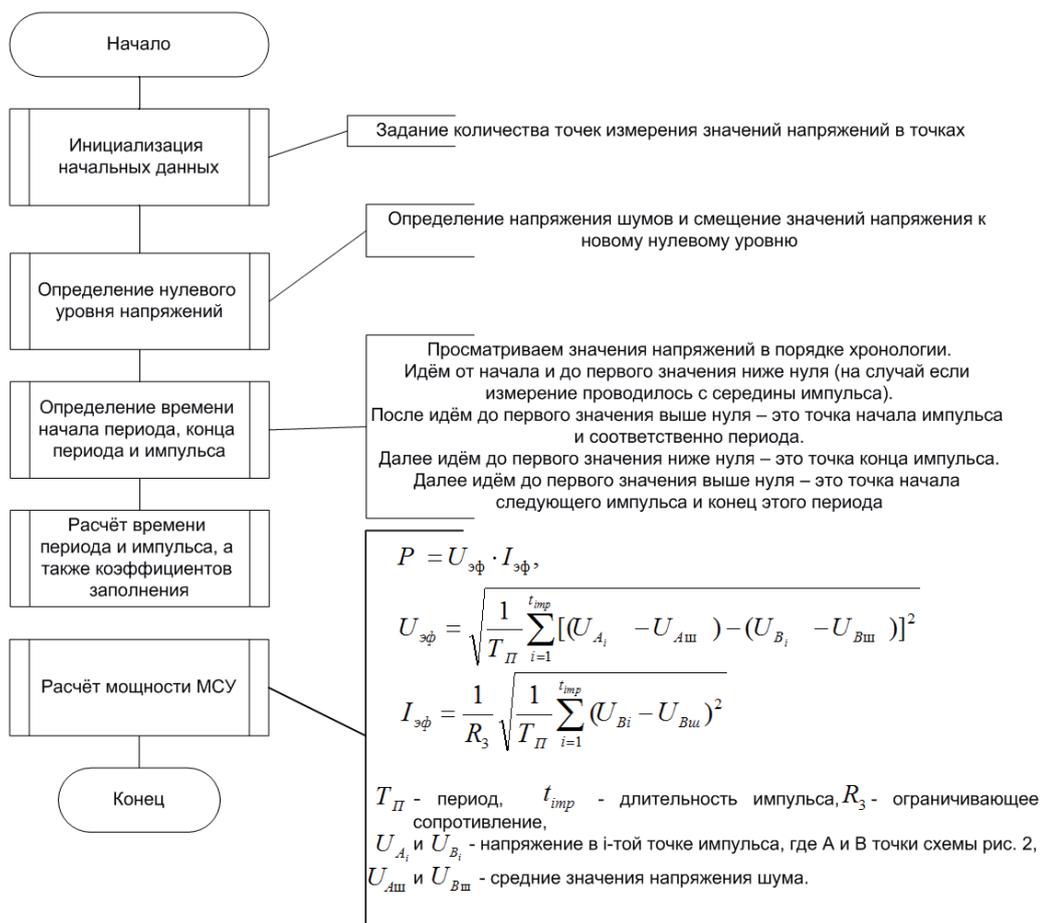


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма программы для определения энергетических характеристик МСУ, реализованной в Mathcad.

Таблица 1. Параметры основных характеристик МСУ при возбуждении импульсами прямоугольной формы с частотой следования импульсов 1 кГц и скважностью 5

Наименование величины	Обозначение	Расчетное значение	Единица измерения
Время длительности одного периода импульса напряжения и тока	$T_{\Pi}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	с
Время длительности импульса напряжения и тока	$t_{имп}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	с
Коэффициент заполнения	$K_з$	20	%
Эффективное значение напряжения	$U_{эф}$	4,118	В
Эффективное значение тока	$I_{эф}$	0,854	А
Потребляемая мощность Led	$P$	0,717	Вт
Средняя мощность излучения	$P_{из}$	0,1346	Вт
Энергетическая эффективность	$\eta$	18,8	%

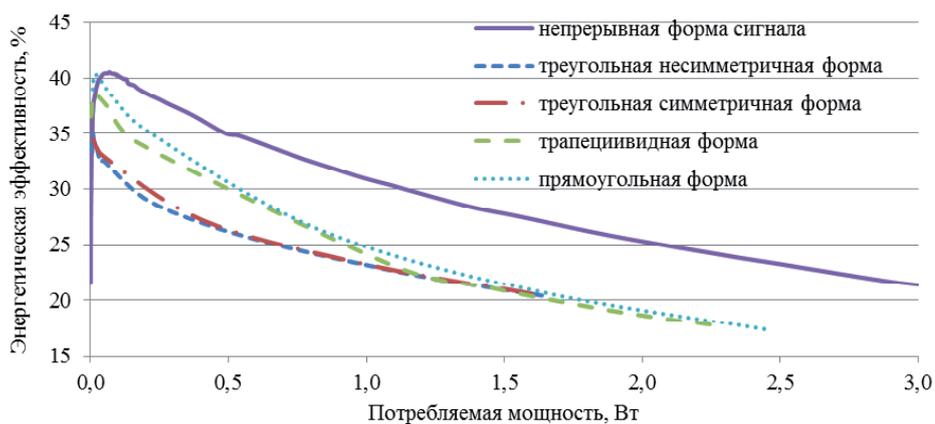


Рисунок 4. График зависимости энергетической эффективности МСУ от формы питающего сигнала при частоте следования импульсов 1 кГц

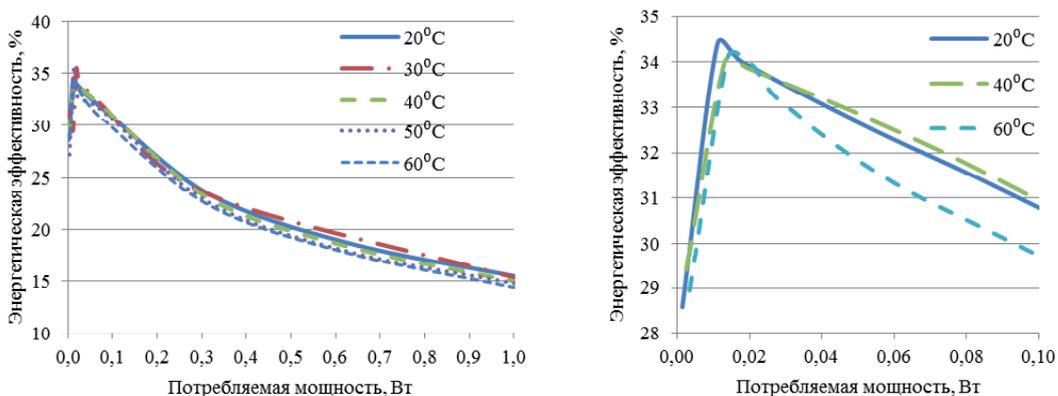


Рисунок 5. График зависимости энергетической эффективности МСУ от температуры подложки

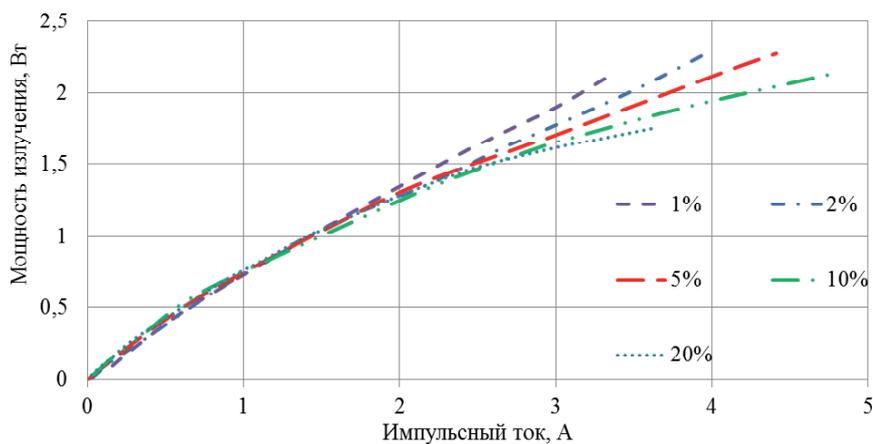


Рисунок 6. График зависимости мощности излучения МСУ от импульсного тока при возбуждении импульсами прямоугольной формы с частотой следования 1 кГц и длительностью от 10 мкс до 200 мкс.

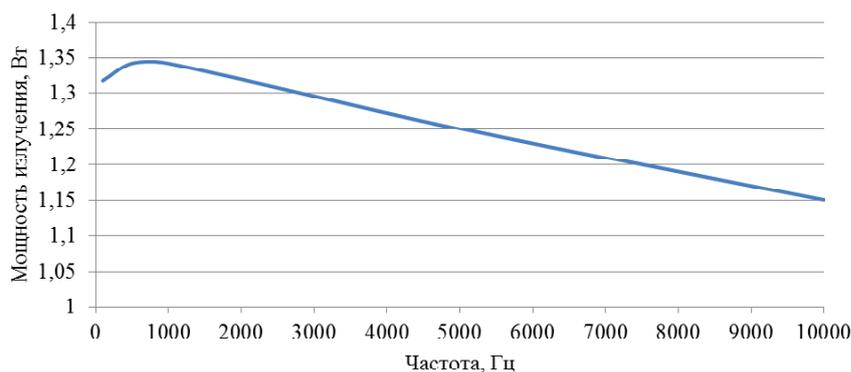


Рисунок 7. Зависимость мощности излучения МСУ от частоты возбуждающих импульсов при длительности импульса 50 мкс и мощности 10 Вт

### Заключение

Таким образом, разработана и реализована методика определения энергетических и оптических характеристик макета светотехнического устройства при импульсном возбуждении в программной среде Mathcad. Методика позволяет определять эффективное значение потребляемой мощности, мощность излучения и энергетическую эффективность МСУ.

Максимальные значения эффективности при импульсном возбуждении и непрерывной форме сигнала для МСУ составляет порядка 40%. Разница в значениях эффективности при потребляемой мощности (номинальный режим) при непрерывном питании и импульсном возбуждении с коэффициентом заполнения 50% составляет порядка 5%.

В диапазоне потребляемых мощностей до 0,02 Вт эффективность МСУ практически не зависит от температуры подложки.

Форма питающего импульса влияет на энергетическую эффективность МСУ. При возбуждении холодно-белых светодиодов импульсами треугольной, трапециевидной формы эффективность ниже, чем при прямоугольной форме импульсного возбуждения.

Исследованные мощностные характеристики показали значительное влияние длительности импульса накачки для токов превышающих 2 А на эффективность излучательной рекомбинации.

Увеличение частоты питающего тока приводит к снижению эффективности кристалла при одинаковых длительности и мощности возбуждающего импульса.

Предлагаемая методика и полученные результаты измерений позволяют оптимизировать режимы работы проектируемых светотехнических устройств на базе светодиодов при импульсном режиме питания.

10.07.2015

### Список литературы:

1. Гафуров, Х.Г. Зависимость энергетических характеристик светодиода от временных параметров сигнала питания / Х.Г. Гафуров, Ф.Х. Гафуров, М. Каюмова // Учёные записки естественные и экономические науки. – 2012. – №2(21). – С. 20–26.
2. Скрипниченко А. Импульсное питание светодиодов Cree XLamp с повышенным током / А. Скрипниченко // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №1. – С. 16–19.
3. Картамышев А.В. Метод восстановления формы сигнала для системы измерения параметров Led: автореф. дис. канд. техн. наук: 23.10.2008 / А.В. Картамышев; Санкт-Петербургский гос. пол. университет. – Санкт-Петербург, 2008. – 18 с.
4. Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы: материалы 5 Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, изд-во Политехнический универ.; под. ред. П.К. Кашкаров [и др.]. – СПб., 2007, – 395с.
5. Никифоров, С. Особенности определения квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN и AlGaInP при различной плотности тока через излучающий кристалл / С. Никифоров, А. Архипов // Компоненты и технологии. – 2008. – №1. – С. 82–85.
6. Мышонков А.Б. Исследование характеристик светодиодных источников света при питании импульсным током: автореф. дис. канд. техн. наук: 16.05.2012 / А.Б. Мышонков; Мордовский гос. универ. им. Н.П. Огарёва – Саранск, 2012. – 22 с.
7. Кузмин В. Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов / В. Кузмин, В. Антонов, О. Круглов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №3, С. 26-30.
8. Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик: ГОСТ Р 8.749-2011. – Введ. 01.05.01; – Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартинформ, 2014. – 14с.

9. Баковец, Н.В. Метод калибровки фотометрического шара / Н.В. Баковец, Д.В. Скумс, О.Б. Тарасова // Метрология и приборостроение.– 2014. – №4. – С. 11-16.
10. Савкова, Т.Н. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля / Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, №1.– Гомель. -2013, С.55-60.
11. Справочник по электрическим конденсаторам / Академия наук МССР, отдел энергетической кибернетики; под. ред.: В.В. Ермуратского. – Кишинёв.: изд. «Штинца», 1982. – 308 с.
12. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для электротех., энергетич., приборостроит., спец. вузов.:9-е изд., перераб. и доп. / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 640с.
13. Mathcad 14 для студентов и инженеров. Русская версия: Валерий Очков — Москва, БХВ-Петербург, 2009 г.– 512 с.
14. Фотометрия импульсная. Термины и определения: ГОСТ 24286-88. – Введ. 01.01.90; – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам: Издательство стандартов, 1988. –15 с.

Сведения об авторах:

**Савкова Татьяна Николаевна**, аспирант кафедры электроснабжения, sa\_ta@mail.ru

**Кравченко Александр Ильич**, доцент кафедры физики, кандидат физико-математических наук

**Кухаренко Сергей Николаевич**, старший преподаватель кафедры промышленной электроники

**Лукашов Вячеслав Михайлович**, ассистент кафедры промышленной электроники

**Свинтицкий Александр Владимирович**, студент

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого  
246746, Республика Беларусь, г. Гомель, пр-т Октября, 48, rector@gstu.by