

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЯ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

*Савкова Т.Н., Кравченко А.И., Селиверстов Г.И.,
Колесник Ю.Н., Кухаренко С.Н.*

Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь

На основе анализа совокупности факторов, влияющих на стоимость светодиодного устройства, предложен уточненный критерий оценки составляющей стоимости единицы световой энергии, позволяющий повысить точность расчетов при оценке экономических показателей при проектировании светодиодных устройств и создать оптимальный режим работы устройства.

Ключевые слова: *светодиодное устройство; критерии оценки эффективности; составляющая стоимости световой энергии.*

THE CHOICE AND JUSTIFICATION OF EFFICIENCY ASSESSMENT CRITERION WHEN DESIGNING LED LIGHTING DEVICE

*Savkova T.N., Kravchenko A.I., Seliverstov G.I.,
Kolesnic Y.N., Kukharenko S.N.*

Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

A proposed criterion has been based on the analysis of a set of factors affecting the cost of an LED device. Efficiency assessment criterion of a light energy unit component cost is refined to increase the accuracy of calculations when assessing economic indicators in the design of LED devices and to create an optimal mode of device operation.

Keywords: LED device; criteria for evaluating efficiency; component of the cost of light energy.

В условиях постоянно растущих потребностей в использовании искусственного освещения остро стоит вопрос о высокоэффективных источниках света, способных удовлетворить спрос на освещение при минимальных затратах электроэнергии. На нужды освещения расходуется 19% мирового потребления электроэнергии, в Республике Беларусь – 14% [1]. По расчетам ученых Philips Lighting современные светодиодные технологии позволяют сэкономить до 40% потребляемой электроэнергии, что эквивалентно 2,124 млрд. кВт·ч экономии в год или 261252 т.у.т. При этом следует отметить, что на создание 1 кВт новых генерирующих мощностей необходимо затратить около 2000 долларов, а на экономию 1 кВт мощности в системах освещения достаточно 200–250 долларов [2].

В республике Беларусь создано производство светильников на основе импортной светодиодной элементной базы и материалов. На этапе проектирования светодиодных устройств необходимо решать многопараметрическую задачу по выбору производителя, единичной мощности светодиодов и их количества, возбуждающего тока светодиодов, эффективности, размеров радиатора, типа драйвера, срока службы и стоимости. При проектировании существует огромное многообразие возможных конструкторских решений, что существенно расширяет задачи поиска оптимальных решений и обуславливает целесообразность моделирования работы светодиодов при различных режимах работы.

Эффективной следует считать такое светодиодное устройство, которое создает высококачественное освещение и сохраняет свои характеристики на протяжении длительной работы при наименьших капитальных затратах, наибольшем сроке службы и минимальном энергопотреблении.

Целью настоящей работы является обоснование уточненного критерия оценки составляющей стоимости световой энергии при оптимизации затрат на этапе проектирования светодиодных устройств.

В работах [3, 4] в качестве критерия предложены – частичная стоимость светодиодного устройства с учетом теплового сопро-

тивления и стоимости радиаторов, стоимости светодиодов, потребляемого тока, рабочей температуры светодиодов. Однако оценка качества светодиодного устройства без учета эффективности светодиодов и срока службы является недостаточной.

Методика [5] разработана для экономической оценки светотехнических установок. Для поиска оптимальных решений она требует полностью завершенной проектной работы и знания большого числа параметров, затрудняющих поиск решения [6].

В работах [7–15] в качестве критерия использовалась стоимость световой (фотосинтезируемой) энергии как для сравнения эффективности осветительных установок с различными источниками света, так и для выбора оптимального источника света (таблица 1).

Таблица 1.

Расчетные формулы для определения стоимости световой энергии

| Область применения критерия оценки | Формула для расчета критерия оценки | № формулы |
|---|--|-----------|
| Сравнение эффективности осветительных установок | $G = q \cdot \eta_v^{-1} + C_{ис}(\Phi_{ис} \cdot \tau)^{-1} + C_{сп}(\Phi_{сп} \cdot \eta_{сп} \cdot t \cdot T)^{-1}$, где q – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч; η_v – световая отдача, лм/Вт; $C_{ис}$ ($C_{сп}$) – стоимость источника света (стоимость светового прибора), руб.; $\Phi_{ис}$ – световой поток источника света, клм; $\eta_{сп}$ – к.п.д. светового прибора, отн. ед.; τ – срок службы источника света, ч; t – число часов работы светового прибора, ч; T – срок службы светового прибора, лет | 1[14] |
| | $G = q \cdot \eta_v^{-1} + C_{ис}(\Phi_{ис} \cdot \tau)^{-1}$, | 2[6,16] |
| Сравнение эффективности облучательной установки | $G = q \cdot \eta_{ис}^{-1} + C_{ис}(P_{ис} \cdot \eta_{ис} \cdot \tau)^{-1}$, где $\eta_{ис}$ – к.п.д. источника света, отн. ед.; $P_{ис}$ – мощность источника света, кВт; τ – срок службы источника света, ч | 3[14] |
| Сравнение ИС для осветительных установок. | $G = q \cdot \Phi_{ис} \cdot T \cdot \eta_{ис}^{-1}$, где T – расчетное время использования светового прибора, ч | 4[15] |

В зависимости от области применения критерия расчет стоимости световой энергии включал от 4 до 10 параметров. В качестве единицы измерения стоимости световой энергии использовались руб./кВт·ч·отн. ед. или руб./кВт·ч. Входящие в формулы расчета стоимости световой энергии параметры T и τ применялись без учета температуры p - n перехода светодиодов, что приводило к существенному увеличению значения расчетного критерия и некорректному сравнению светодиодных устройств.

В данной работе предложен уточненный критерий оценки составляющей стоимости световой энергии для оптимизации режима работы светодиодного устройства на этапе проектирования, алгоритм расчета которого представлен на рисунке 1. На основании предложенного алгоритма можно рассчитать экстремум функции нескольких переменных $C_{сз}$ от $P_{потр.}$ методом аппроксимации экспериментальных данных. Это позволяет определить оптимальные значения мощности излучения, температуры p - n перехода, теплового сопротивления, срока службы, энергетического к.п.д. и другие параметры светодиодов светодиодного устройства.

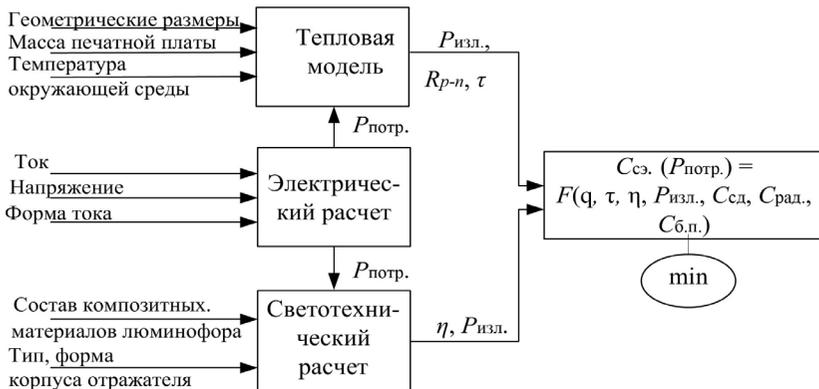


Рис. 1. Алгоритм расчета уточненного критерия оценки составляющей стоимости световой энергии светодиодного устройства

Минимальное значение функции стоимости световой энергии от потребляемой мощности светодиодного устройства обосновывает параметры такого режима устройства с высокой энергетиче-

ской эффективностью, при котором понижается температура $p-n$ перехода светодиодов, и, как следствие, повышается срок безотказной работы, уменьшаются весогабаритные параметры радиатора светодиодного устройства. В качестве примера использования предлагаемого критерия рассмотрен вариант светодиодного устройства на основе холодно-белых светодиодов с номинальной потребляемой мощностью порядка 0,06 Вт, причем число светодиодов, мощность потребления и параметры радиатора рассчитывались на основании измерений энергетических характеристик [17]. В предложенном алгоритме рассматриваются следующие параметры: $C_{св}$ – уточненный критерий составляющей стоимости световой энергии, $P_{потр.}$ – потребляемая мощность; η – энергетический к.п.д., $P_{изл.}$ – мощности излучения и $C_{сд}$, $C_{рад.}$, $C_{б.п.}$ – стоимости светодиодов, радиатора, блока питания. Температура $p-n$ перехода светодиодов и срок службы определялись согласно тепловой модели [18, 19].

Для сравнения эффективности применения критериев оценки определяем значения зависимости составляющей стоимости световой энергии ($C_{св}$) и стоимости световой энергии (G) от потребляемой мощности для варианта светодиодного устройства на основе холодно-белых светодиодов (рисунок 2).

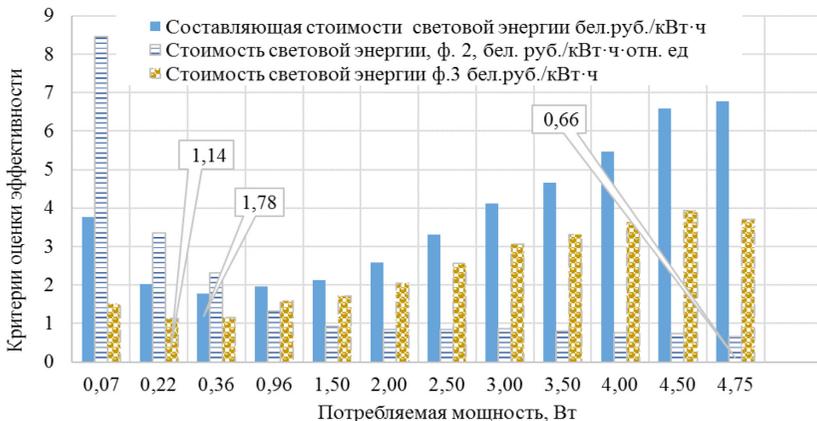


Рис. 2. Гистограмма сравнения зависимости критериев оценки эффективности от потребляемой мощности

Из графика (рисунок 2) видно, что рассматриваемый вариант светодиодного устройства будет работать в эффективном режиме с минимальным значением составляющей стоимости световой энергии в диапазоне от 0,22 до 1,5 Вт, что не приводит к существенно увеличению размеров и стоимости радиатора, снижению срока службы и необоснованному удорожанию устройства.

В свою очередь расчёт критерия оценки по формуле 2 (табл. 1) [14] показывает, что стоимость световой энергии уменьшается с увеличением потребляемой мощности по экспоненциальному закону. Оптимальный режим светодиодного устройства при таком расчете соответствует максимальной потребляемой мощности, что приводит к увеличению температуры p - n перехода светодиодов и соответственно к увеличению размеров радиатора, и возрастанию стоимости светодиодного устройства.

Расчет критерия оценки по формуле 3 (табл. 1) [14] показал, что при значениях больше номинальных стоимость световой энергии зависит от величины первого слагаемого $q \cdot \eta_{\text{ис}}^{-1}$ и не учитывается уменьшение мощности излучения, увеличение температуры p - n перехода светодиодов, размеров радиатора.

Выводы

На основе анализа совокупности факторов, влияющих на стоимость светодиодного устройства предложен уточненный критерий оценки составляющей стоимости единицы световой энергии, позволяющий повысить точность расчетов при оценке экономических показателей при проектировании светодиодных устройств и создать оптимальный режим работы устройства.

Список литературы

1. Добродей А.О. Перспективные разработки в области светодиодных устройств для систем освещения / А.О. Добродей, Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко, Е.Ф. Кудина, Г.И. Семкова // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2009. №3 (38). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-razrabotki-v-oblasti-svetodiodnyh-ustroystv-dlya-sistem-osvescheniya>. Дата доступа: 12.10.2020.

2. Айзенберг Ю.Б. Энергосбережение – одна из важнейших проблем современной светотехники // Светотехника. 2007. № 6. С. 6–10.
3. Вставская Е.В. Оптимизация режима работы светодиодных светильников / Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, В.И. Константинов // Электротехн. комплексы и системы управления. 2011. № 4. С. 14–17.
4. Перри Д. Оптимизация светодиодных систем освещения / Д. Перри // Электрон. компоненты. 2011. № 7. С. 76–79.
5. Ключев С.А. Техничко-экономические расчеты при проектировании осветительных установок // Светотехника. 1975. № 8. С. 18–23.
6. Никитин В.Д., Матющенко А.А., Шаламова Ю.С. Экономический анализ установок наружного освещения // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 1. С. 234–239.
7. Крымов А.В., Никитин В.Д. Анализ экономических показателей полупроводниковых и традиционных источников света // Светотехника. 2012. №2.
8. Крымов А. В., Никитин В.Д. Выбор оптимального источника света и влияние его параметров на временные и экономические характеристики осветительной установки // X Всероссийское совещание «Энергосбережение, энергоэффективность и энергетическая безопасность регионов России». Материалы докладов 18-20 ноября 2009г. Томск: ТМДЦ «Технопарк». 2009. С. 75–79.
9. Никитин В.Д. Энергосбережение: оценка экономичности источников света // В сб.: Матер. междунар. научно-техн. конф. «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы». Томск: Изд-во ТПУ. 2003. С. 297–299.
10. Матющенко А.А., Никитин В.Д. Сравнение экономических показателей ИС // 6-ая междунар. светотехн. конф. Калининград, Светлогорск, 19–21 сентября 2006. М., 2006. С. 85–86.
12. Крымов А.В., Никитин В.Д. Сравнение характеристик полупроводниковых и традиционных источников света // Вестник КрасГАУ. 2010. №4(43). С. 273–279.
13. Никитин В.Д., Завей-Борода В.Р. Энергосбережение в осветительных установках // Матер. докл. 10-й Всеросс. научно-техн. конф. «Энергетика: экология, надежность, безопасность». Томск: Изд-во ТПУ. 2004. С. 322–326.

14. Козырева И.Н. Сравнение источников излучения для растениеводства по стоимости единицы световой энергии и аналогам. / И.Н. Козырева, В.Д. Никитин // Научный журнал КубГАУ. 2014. №99(05). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/75.pdf>. Дата доступа: 12.10.2020.
15. Вязигин В.Л., Критерии выбора источников света для осветительных установок / В.Л. Вязигин, И.М. Вершинин, А.В. Сизиков, С.В. Тенюнин, А.В. Черкасова // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №6(48). Часть 2 . С. 49–52.
16. Горошкина К.В., Сравнение экономической эффективности источников света общего назначения. – Режим доступа: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C40/100.pdf>. Дата доступа: 12.10.2020.
17. Савкова Т.Н. Оптимизация режимов работы макета светотехнического устройства на основе светодиодов / Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко, Е.Н. Подденежный, И.П. Кравченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. №5-2 (313). С. 266–272.
18. Савкова Т.Н. Калориметрический способ определения тепловых характеристик мощных светодиодов / Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко, Ю.Н. Колесник // Естественные и технические науки. 2016. №11. С. 152–155.
19. Широков О.Г., Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств / О.Г. Широков, Д.И. Зализный // Наукоёмкие технологии. 2008. № 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/13202>(дата обращения: 29.06.2020).

References

1. Dobrodey A.O., Perspektivnye razrabotki v oblasti svetodiodnykh ustroystv dlya sistem osveshcheniya / A.O. Dobrodey, E.N. Poddenezhnyy, A.A. Boyko, E.F. Kudina, G.I. Semkova // Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo. 2009. №3 (38). Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-razrabotki-v-oblasti-svetodiodnyh-ustroystv-dlya-sistem-osvescheniya>. Data dostupa: 12.10.2020.
2. Ayzenberg Yu.B., Energoberezhenie – odna iz vazhneyshikh problem sovremennoy svetotekhniki / // Svetotekhnika. 2007. № 6. S. 6–10.

3. Vstavskaya E.V. Optimizatsiya rezhima raboty svetodiodnykh svetil'nikov / E.V. Vstavskaya, T.A. Barbasova, V.I. Konstantinov // *Elektrotekhn. komplekсы i sistemy upravleniya*. 2011. № 4. S. 14–17.
4. Perri D. Optimizatsiya svetodiodnykh sistem osveshcheniya / D. Perri // *Elektron. komponenty*. 2011. № 7. S. 76–79.
5. Klyuev S.A. Tekhniko-ekonomicheskie raschety pri proektirovanii osvetitel'nykh ustanovok // *Svetotekhnika*. 1975. № 8. S. 18–23.
6. Nikitin V.D., Matyushchenko A.A., Shalamova Yu.S. Ekonomicheskiy analiz ustanovok naruzhnogo osveshcheniya // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007. T. 310. № 1. S. 234–239.
7. Krymov A.V., Nikitin V.D. Analiz ekonomicheskikh pokazateley poluprovodnikovyykh i traditsionnykh istochnikov sveta // *Svetotekhnika*. 2012. №2.
8. Krymov A.V., Nikitin V.D. Vybór optimal'nogo istochnika sveta i vliyaniye ego parametrov na vremennyye i ekonomicheskie kharakteristiki osvetitel'noy ustanovki // X Vserossiyskoye soveshchaniye «Energoberezhniye, energoeffektivnost' i energeticheskaya bezopasnost' regionov Rossii». Materialy dokladov 18–20 noyabrya 2009g. Tomsk: TMDTs «Tekhnopark». 2009. S. 75–79.
9. Nikitin V.D. Energoberezhniye: otsenka ekonomichnosti istochnikov sveta // V sb.: *Mater. mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Elektroenergetika, elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы»*. Tomsk: Izd-vo TPU. 2003. S. 297–299.
10. Matyushchenko A.A., Nikitin V.D. Sravneniye ekonomicheskikh pokazateley IS // 6-aya mezhdunar. svetotekhn. konf. Kaliningrad, Svetlogorsk, 19–21 sentyabrya 2006. M., 2006. S. 85–86.
12. Krymov A.V., Nikitin V.D. Sravneniye kharakteristik poluprovodnikovyykh i traditsionnykh istochnikov sveta // *Vestnik KrasGAU*. 2010. №4(43). S. 273–279.
13. Nikitin V.D., Zavey-Boroda V.R. Energoberezhniye v osvetitel'nykh ustanovkakh // *Mater. dokl. 10-y Vseross. nauchno-tekhn. konf. «Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost'»*. Tomsk: Izd-vo TPU. 2004. S. 322–326.
14. Kozyreva I.N., Sravneniye istochnikov izlucheniya dlya rastenievodstva po stoimosti edinitsy svetovoy energii i analogam. / I.N. Kozyreva, V.D.

- Nikitin // Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2014. №99(05). Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/75.pdf>. Data dostupa: 12.10.2020.
15. Vyazigin V.L., Kriterii vybora istochnikov sveta dlya osvetitel'nykh ustanovok / V.L. Vyazigin, I.M. Vershinin, A. V. Sizikov, S.V. Tenyunin, A.V. Cherkasova // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2016. №6(48). Chast' 2 . S. 49–52.
 16. Goroshkina K.V., Sravnenie ekonomicheskoy effektivnosti istochnikov sveta obshchego naznacheniya. Rezhim dostupa: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C40/100.pdf>. Data dostupa: 12.10.2020.
 17. Savkova T.N. Optimizatsiya rezhimov raboty maketa svetotekhnicheskogo ustroystva na osnove svetodiodov / T.N. Savkova, A.I. Kravchenko, E.N. Poddenezhnyy, I.P. Kravchenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2015. №5-2 (313). S. 266–272.
 18. Savkova T.N. Kalorimetricheskyy sposob opredeleniya teplovykh kharakteristik moshchnykh svetodiodov / T.N. Savkova, A.I. Kravchenko, Yu.N. Kolesnik // Estestvennye i tekhnicheskije nauki. 2016. №11,– S. 152–155.
 19. Shirokov O.G., Teplovye skhemy zameshcheniya elektroenergeticheskikh ustroystv / O.G. Shirokov, D.I. Zaliznyy // Naukoemkie tekhnologii. 2008. № 2. [Elektronnyy recurs]. Rezhim dostupa: [https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/13202\(data obrashcheniya: 29.06.2020\)](https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/13202(data obrashcheniya: 29.06.2020)).