



Закордонец В.С.

Закордонец В.С., канд. физ.-мат. наук, доцент
Кутузова Н.В.

Тернопольский национальный технический
университет, ул. Русская, 56, Тернополь, 46001,
Украина, e-mail: wladim21@gmail.com



Кутузова Н.В.

РАСЧЕТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ

В работе построены физическая и математическая тепловые модели термоэлектрической системы охлаждения. Решена система уравнений, включающая стационарное уравнение теплопроводности, уравнение термогенерации и уравнение генерации холода. Рассчитана температура гетероперехода светодиода (СД) в зависимости от его мощности, полного теплового сопротивления системы охлаждения, температуры окружающей среды и холодопроизводительности термоэлектрического охлаждающего модуля (ТЭОМ). Получены аналитические зависимости температуры гетероперехода от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД и значениях теплового сопротивления системы охлаждения. При заданной тепловой мощности СД и тепловом сопротивлении системы охлаждения найдена оптимальная величина тока питания ТЭОМ, при котором температура гетероперехода СД достигает минимума. Показано, что использование ТЭОМ дает возможность уменьшить температуру гетероперехода СД до значений более низких, чем температура окружающей среды. Это особенно актуально в условиях, при которых температура среды близка к критической температуре гетероперехода. Показано, что эффективность использования ТЭОМ снижается при увеличении мощности СД, температуры окружающей среды и полного теплового сопротивления системы охлаждения. Библ. 11, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: светодиод, гетеропереход, тепловой режим, тепловое сопротивление, термостабилизация, термоэлектрический охлаждающий модуль, радиатор.

Введение

Современные полупроводниковые источники света имеют КПД преобразования электрической энергии в световую близкий к 30 % [1, 2]. Таким образом, почти 70 % подведенной энергии превращается в тепло. В условиях увеличения мощности СД традиционные системы термостабилизации не всегда обеспечивают адекватные тепловые режимы. Если тепловую энергию не отводить, то чрезмерный нагрев СД приведет к деградации его световых характеристик и уменьшит срок его службы. Кроме того, увеличение температуры уменьшит яркость свечения и световой поток.

Для повышения эффективности термостабилизации мощных СД применяются активные способы теплоотвода: вентиляторы, жидкостное охлаждение, термоэлектрическое охлаждение и др. Термоэлектрические системы охлаждения обладают рядом преимуществ в сравнении с другими системами, а именно: высокой надежностью и отсутствием подвижных частей, компактностью и небольшой массой, малой инерционностью и бесшумностью работы.

Применение ТЭОМ наделяет систему теплоотвода функцией охлаждения, т.е. дает возможность достичь температуры гетероперехода СД более низкой, чем температура окружающей среды. Особенно актуальным это становится в условиях, при которых температура среды становится равной либо превышает температуру гетероперехода СД.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что проблема стабилизации теплового режима СД уже освещалась в ряде работ. В частности, в [3, 4] рассмотрены вопросы обеспечения теплового режима СД. Особое внимание уделено проблеме минимизации теплового сопротивления при использовании различных моделей радиаторов. Рассмотрены инновационные технологии охлаждения СД с применением струйного обдува. Однако расчет теплового режима в этих работах не проводился. В [5] с использованием известных формул теплотехники и данных наблюдений за реальными температурными режимами разработана методика выбора эффективного радиатора. При этом для интенсификации теплообмена радиатора с окружающей средой использовался вентиляторный обдув. В [6] проведен теоретический анализ теплового режима СД с выносным радиатором и традиционным охлаждением. Рассчитана температура перегрева гетероперехода СД в зависимости от его мощности и параметров теплопровода и радиатора. Термоэлектрическое охлаждение СД при этом не рассматривалось.

В силу сказанного выше, целью работы является построение физической и математической тепловых моделей термоэлектрической системы охлаждения СД и расчет на их основе температуры перегрева гетероперехода в зависимости от мощности СД, теплового сопротивления системы охлаждения и холодопроизводительности ТЭОМ.

Для достижения цели путем теоретического анализа устанавливались аналитические соотношения между мощностью СД, тепловым сопротивлением системы охлаждения, холодопроизводительностью ТЭОМ и температурой гетероперехода СД. Эти соотношения дают возможность рационально выбрать схему охлаждения СД с целью обеспечения максимального светового потока при минимальной температуре гетероперехода.

Результаты исследований и их обсуждение.

Известно, что СД генерирует тепловую мощность

$$P_t = (1 - \eta_e) U_f I_f, \quad (1)$$

где I_f и U_f прямой ток и прямое напряжение СД, η_e – его квантовая эффективность.

Очевидно, что ТЭОМ должен поглощать мощность не меньшую, чем тепловая мощность СД, поскольку в противном случае стабилизация теплового режима будет невозможной. Если же ТЭОМ будет поглощать избыточную мощность, то на его холодной поверхности будет образовываться конденсат, что может привести к короткому замыканию. Единственным возможным способом сделать использование ТЭОМ эффективным является включение в схему охлаждения электронного блока регулировки мощности и холодопроизводительности ТЭОМ в зависимости от температуры гетероперехода СД.

Будем считать, что тепловая мощность СД полностью поглощается холодной поверхностью ТЭОМ.

$$P_t = P_c, \quad (2)$$

а от горячей поверхности при помощи радиатора отводится тепловая мощность P_h .

Для расчета теплового режима СД воспользуемся методом электротепловой аналогии [7]. Физическая модель и тепловая схема термоэлектрической системы охлаждения СД приведены на рис. 1.

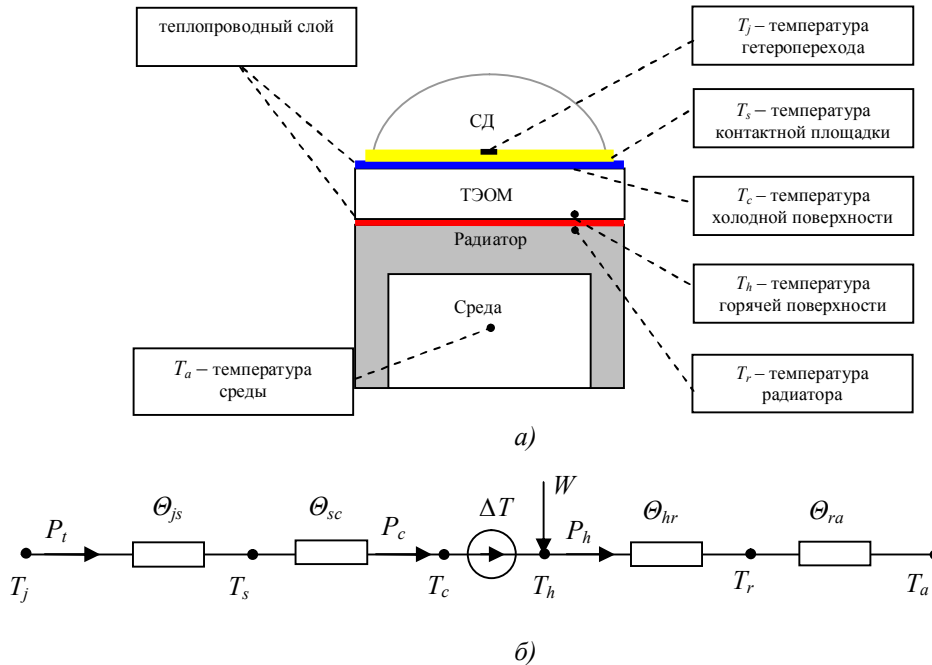


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрической системы охлаждения светодиода с ТЭОМ и радиатором (а) и ее тепловая схема (б). Здесь T_j – температура гетероперехода СД; T_s – температура контактной площадки; T_c и T_h – температура холодной и горячей поверхностей ТЭОМ, соответственно; T_r – температура радиатора; T_a – температура среды; ΔT – перепад температуры между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ.

На схеме каждый элемент характеризуется своим тепловым сопротивлением. А именно: Θ_{js} – тепловое сопротивление между гетеропереходом и контактной площадкой; Θ_{sc} и Θ_{hr} – соответственно тепловые сопротивления между контактной площадкой и холодной поверхностью ТЭОМ и между горячей поверхностью ТЭОМ и радиатором; Θ_{ra} – тепловое сопротивление между радиатором и средой; $\Delta T = T_h - T_c$ – перепад температуры между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ, обусловленный эффектом Пельтье.

Тепловой схеме отвечает уравнение термического равновесия:

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T. \quad (3)$$

Тепловая мощность, поглощаемая ТЭОМ (холодопроизводительность), определяется соотношением [8, 9]:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (4)$$

а от горячей поверхности при помощи радиатора отводится тепловая мощность P_h , равная

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (5)$$

где α , κ , и R – коэффициент дифференциальной термоЭДС, теплопроводность и сопротивление полупроводникового материала ветвей термоэлементов ТЭОМ; T_c и T_h – температуры холодной и горячей поверхностей ТЭОМ; I – ток источника питания ТЭОМ.

Мощность, выделяемая на горячей поверхности ТЭОМ, превышает мощность, поглощаемую холодной поверхностью, на величину затрат электроэнергии источника питания:

$$P_h = P_c + W. \quad (6)$$

Мощность W затрачивается на выполнение работы по перемещению зарядов против разности электрических потенциалов, возникающей в соответствии с законом Зеебека в термоэлектрической цепи, и на тепловые потери Джоуля:

$$W = P_h - P_c = \alpha I \Delta T + I^2 R. \quad (7)$$

Из уравнения термического равновесия для температуры перегрева гетероперехода СД получим:

$$\Delta T_j = T_j - T_a = P_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha I \Delta T + I^2 R) \cdot \Theta_h - \Delta T, \quad (8)$$

где $\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$ и $\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$ – полные тепловые сопротивления со стороны холодной и горячей поверхностей ТЭОМ.

Перепад температуры ΔT при этом определяется так:

$$\Delta T = \frac{1}{\kappa} \cdot \left(\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - P_c \right). \quad (9)$$

В формуле (8) первое слагаемое описывает увеличение температуры гетероперехода при передаче тепловой мощности, выделяемой СД и самим ТЭОМ. Два последних слагаемых определяют влияние ТЭОМ на температуру гетероперехода СД. Охлаждение обеспечивается за счет перепада температур между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ. В итоге, именно от соотношения величин этих слагаемых зависит эффективность работы термоэлектрической системы охлаждения.

Температура гетероперехода СД определяется его мощностью, тепловым сопротивлением системы охлаждения, температурой окружающей среды и режимом работы ТЭОМ. Управление режимом работы ТЭОМ осуществляется путем изменения величины тока питания. При разработке и эксплуатации термоэлектрической системы охлаждения важным вопросом является выбор оптимального тока, при котором происходит эффективное охлаждение.

С целью анализа полученных результатов рассмотрим влияние тока питания ТЭОМ на эффективность охлаждения СД при заданных значениях мощности и теплового сопротивления последнего. В качестве источника света, т.е. СД, выберем современную светодиодную матрицу *XLamp CMA1516*, параметры которой, взятые из [10], приведены в таблице.

Таблица

Параметры СД XLamp CMA1516

Максимальный ток, А	Максимальное напряжение, В	Максимальная мощность, Вт	Световой поток, лм	Тепловое сопротивление СД Θ_{j-s} , К/Вт
1.05	39	41	1400 - 4800	0.4

Мощностью СД можно управлять в широких пределах, изменяя напряжение или ток питания. Очевидно, что максимальная мощность СД не должна превышать максимальной холодопроизводительности ТЭОМ. Для данной светодиодной матрицы максимальная тепловая мощность равна

$$P_{t\max} = (1 - \eta_e) U_{f\max} I_{f\max} = 30 \text{ Вт.} \quad (10)$$

Типономинал ТЭОМ выбирался, исходя из тепловой мощности, габаритных размеров и требований к температурному режиму эксплуатации СД. При проведении численных расчетов были использованы характеристики серийных ТЭОМ *TB-161* [11] с параметрами: максимальный ток $I_{\max} = 5.7 \text{ А}$, максимальное напряжение $U_{\max} = 18.3 \text{ В}$, максимальная холодопроизводительность при нулевой разности температур $P_{c,\max} = 66.3 \text{ Вт}$, максимальный перепад температуры при нулевой холодопроизводительности $\Delta T_{\max} = 70 \text{ К}$.

Применение ТЭОМ всегда связано с использованием того или иного радиатора, который должен рассеять не только тепло, выделяемое СД, но и тепло Джоуля, выделяющееся в термоэлементе при прохождении через него электрического тока. Тепловое сопротивление современных радиаторов, оснащенных вентиляторами, составляет $\Theta_{ra} = 0.3 \div 0.6 \text{ К/Вт}$. Наилучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают значений $\Theta_{ra} = 0.1 \text{ К/Вт}$. Жидкостные теплоотводящие системы еще более эффективны. Их тепловое сопротивление составляет $\Theta_{ra} = 0.1 \div 0.01 \text{ К/Вт}$, но при этом они громоздки и с трудом сочетаются с осветительной системой.

В результате численного анализа полученных соотношений был получен ряд зависимостей, которые представлены на приведенных ниже рисунках. В частности, на рис. 2 представлена зависимость величины перегрева гетероперехода СД от тока питания ТЭОМ при различных величинах тепловой мощности СД.

Минимумы на зависимостях $\Delta T_j(I)$ соответствуют режимам работы с максимальной эффективностью системы охлаждения, при которой достигается наименьшая температура гетероперехода. Очевидно, что при токах питания, близких к оптимальному, термоэлектрическая система охлаждения позволяет получить более низкие значения температуры гетероперехода в сравнении с традиционной. Штриховыми линиями на рисунке показаны величины перегрева, обеспечиваемые системой охлаждения без ТЭОМ, рассчитанные по формуле (7) для таких же значений тепловых сопротивлений.

Зависимость величины перегрева гетероперехода от тока питания ТЭОМ при различных значениях теплового сопротивления с горячей стороны ТЭОМ представлена на рис. 3.

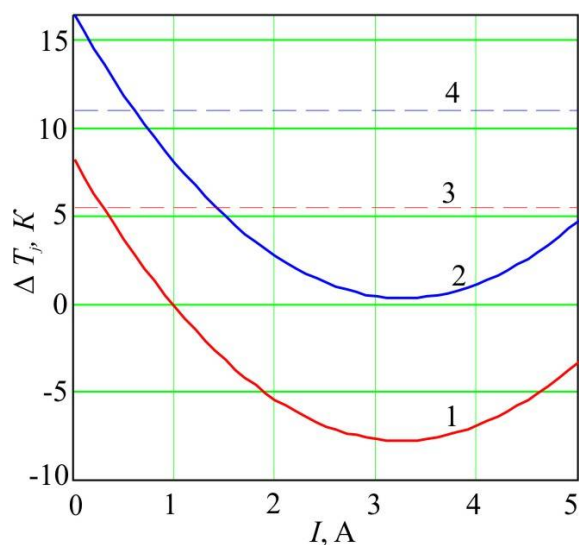


Рис. 2. Зависимость величины перегрева гетероперехода СД от тока питания ТЭОМ при различных величинах мощности СД и при тепловых сопротивлениях $\Theta_c=0.6$ К/Вт, $\Theta_h=0.2$ К/Вт. Сплошные линии 1 и 2 при $P_c=10$ Вт и $P_c=20$ Вт, соответственно. Штриховые линии 3 и 4 соответствуют тем же мощностям и тепловым сопротивлениям, но при отсутствии ТЭОМ.

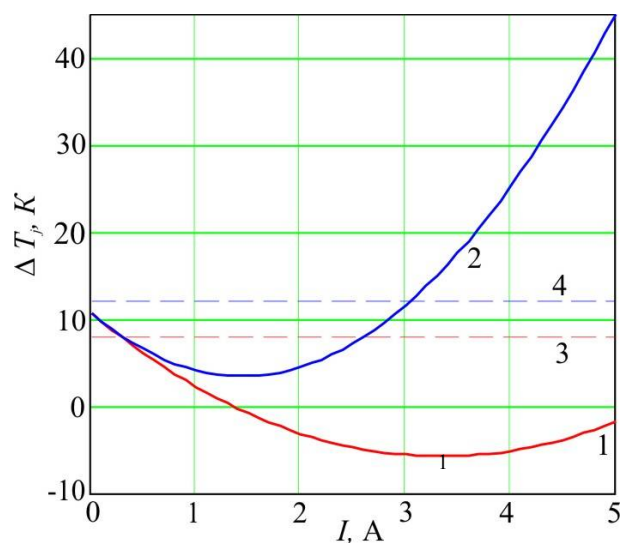


Рис. 3. Зависимость величины перегрева гетероперехода от тока питания ТЭОМ при мощности СД $P_c=10$ Вт и при различных значениях теплового сопротивления с горячей стороны ТЭОМ. Сплошные линии 1 и 2 построены при $\Theta_h=0.2$ К/Вт и $\Theta_h=0.6$ К/Вт, соответственно. Штриховые линии 3 и 4 – при той же мощности и тепловых сопротивлениях, но при отсутствии ТЭОМ.

Очевидно, что с ростом величины Θ_h эффективность охлаждения снижается, а минимумы зависимостей $\Delta T_j(I)$ сдвигаются в область меньших значений тока питания. При определенных соотношениях между мощностями ТЭОМ и СД возможно снижение температуры гетероперехода до температуры среды, а иногда и до температуры более низкой, чем температура среды. Это особенно актуально в случае близости температуры среды к критической температуре гетероперехода СД.

Зависимость перепада температуры от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД представлена на рис. 4.

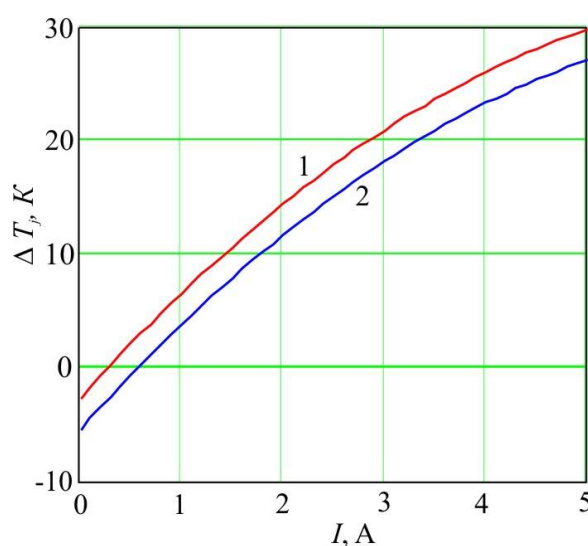


Рис. 4. Зависимость перепада температуры от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД. Кривая 1 при $P_c=10$ В, кривая 2 при $P_c=20$ В.

Из рисунка видно, что с увеличением тока перепад температуры между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ возрастает. Кроме того, он зависит от тепловой нагрузки. В частности, с ростом тепловой мощности СД перепад температуры уменьшается, и, наоборот, при уменьшении мощности – возрастает.

На величину теплового сопротивления системы охлаждения существенно влияет режим работы ТЭОМ и мощность тепловой нагрузки. Если температура гетероперехода СД сравняется с температурой среды либо станет ниже этой температуры, тепловое сопротивление системы станет нулевым, либо даже отрицательным.

Выводы

В условиях близости температуры среды к критической температуре гетероперехода СД для стабилизации его теплового режима целесообразно применять термоэлектрические модули охлаждения.

При данной тепловой мощности СД и тепловом сопротивлении системы охлаждения существует оптимальная величина тока питания ТЭОМ, при которой температура гетероперехода СД достигает минимума. При токах, близких к оптимальному, термоэлектрическая система охлаждения позволяет получать более низкие значения температуры гетероперехода в сравнении с традиционной.

При оптимальном соотношении между мощностями ТЭОМ и СД термоэлектрическая система охлаждения позволяет снижать температуру гетероперехода СД до температур более низких, чем температура окружающей среды. Эффективность применения ТЭОМ снижается при увеличении тепловой мощности СД и суммарного теплового сопротивления системы охлаждения.

При анализе эффективности работы системы охлаждения следует руководствоваться не только параметрами ТЭОМ, но и параметрами системы охлаждения СД в целом: суммарным

тепловым сопротивлением системы охлаждения, тепловой нагрузкой и режимом работы ТЭОМ.

Литература

1. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 140-146.
2. Гонин М. Спасительная прохлада или теплоотвод для мощных светодиодных матриц / М. Гонин // Новости электроники+светотехника. – 2013. – № 2.
3. Полищук А.А. Обеспечение теплового режима светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств / А.А. Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 42-45.
4. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – № 17. – С. 21-23.
5. Лотар Ноэль. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов / Лотар Ноэль // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13-15.
6. Zakordonets V. Theoretical analysis of thermal conditions and ways of led temperature stabilization / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2016. — № 4 (84). — С. 105–112.
7. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. – 327 с.
8. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
9. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40-46.
10. <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CMA1516.pdf>.
11. <http://kryothermtec.com/ru/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>.

Поступила в редакцию 08.10.2018

Volodymyr Zakordonets, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)
Natalija Kutuzova

Ternopil National Technical University,
56, Russian st., Ternopol, 46001, Ukraine,
e-mail: wladim21@gmail.com

CALCULATION OF THERMOELECTRIC SYSTEM FOR COOLING LEDS

In this paper, the thermal mathematical model of thermoelectric cooling system is constructed. The system of equations which includes the stationary thermal conductivity equation, the

thermogenesis equation and cold generation equation is solved. The temperature of LED heterojunction is calculated, depending on its power, total thermal resistance of cooling system, ambient temperature and cold productivity of TCM. The analytical dependences of heterojunction temperature on TCM supply current were obtained at different LED powers and at different values of thermal resistance of cooling system. With the given thermal power of LED and thermal resistance of cooling system, an optimal value of the TCM supply current is found, whereby the temperature of LED heterojunction reaches the minimum. It is shown that the use of TCM allows reducing the temperature of LED heterojunction to values lower than ambient temperature. This is particularly relevant under conditions when ambient temperature is close to the critical temperature of heterojunction. It was shown that the efficiency of using TCM decreases with increasing LED power, ambient temperature and total thermal resistance of cooling system. Bibl. 11, Fig. 4, Tabl. 1.

Key words: LED, heterojunction, thermal mode, thermal resistance, thermal stabilization, thermoelectric cooling module, radiator.

References

1. Nikiforov S. (2005). Temperatura v zhizni i rabote svetodiodov [Temperature in the life and work of LEDs]. Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies, 9, 140-146 [in Russian].
2. Gonin M. (2013). Spasitelnaia prokhlada, ili teplootvod dlia moshchnykh svetodiodnykh matrits [Saving coolness, or heat sink for high-power LED arrays]. Novosti elektroniki + svetotekhnika – Electronics News and Illumination Engineering, 2 [in Russian].
3. Polishchuk A.A. (2006). Obespecheniie teplovogo rezhima svetodiodnykh lamp pri razrabotke svetotekhnicheskikh ustroistv [Providing thermal mode of LED lamps in the development of lighting devices]. Sovremennaiia elektronika – Modern Electronics, 3, 42-45 [in Russian].
4. Staroverov K. (2008). Sistemy okhlazhnediia dlia svedodiodov [Cooling systems for LEDs]. Novosti elektroniki – Electronics News, 17, 21-23 [in Russian].
5. Lotar Noel (2010). Okhlazhediie i regulirovanie temperaturnykh rezhimov svetodiodov [Cooling and control of temperature modes of LEDs]. Poluprovodnikovaia svetotekhnika – Semiconductor Illumination Engineering, 3, 13-15 [in Russian].
6. Zakordonets V., Natalija Kutuzova (2016). Teoretychnyi analiz teplovykh umov i shliakhy stabilizatsii temperatury svitlodiodiv. [Theoretical analysis of thermal conditions and ways of LED temperature stabilization. Bulletin of TNTU]. Visnyk TNTU – Bulletin of TNTU, 4 (84), 105–112 [in Ukrainian].
7. Beliaiev N.M., Riadno A.A. (1982). Metody teorii teploprovodnosti. Chast1. [Methods of thermal conductivity theory. P.1] – Moscow: Vysschaia shkola [in Russian].
8. Anatychuk L.I. (1979). Termoelementy i termoelektricheskie ustroistva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
9. Shostakovskii P. (2009). Sovremennyye resheniia termoelektricheskogo okhlazhdeniia [Modern solutions of thermoelectric cooling]. Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies, 12, 40-46 in Russian].
10. <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CMA1516.pdf>.
11. <http://kryothermtec.com/ru/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>.

Submitted 08.10.2018