

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 628.984

*Т. Н. Савкова*

### АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

UDC 628.984

*T. N. Savkova*

### AUTOMATED CALCULATION OF THE RESIDUAL LIFE OF LED LIGHTING UNITS

#### Аннотация

Рассмотрено решение задачи расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок. На основании представленной структурной схемы тепловых процессов составлена система дифференциальных уравнений тепловых процессов в светодиодной осветительной установке. Разработаны тепловые схемы замещения для стационарного и нестационарного режимов работы. На основании решения системы дифференциальных уравнений для стационарного теплового режима методом эквивалентных преобразований получено выражение для суммарного теплового сопротивления осветительной установки и температуры  $p-n$ -перехода светодиода. Получена формула для расчёта остаточного ресурса светодиодной осветительной установки. Для двух режимов работы осветительной установки представлен расчёт остаточного ресурса.

#### Ключевые слова:

светодиод, светодиодная осветительная установка, остаточный ресурс, тепловое сопротивление, температура  $p-n$ -перехода.

#### Abstract

The solution to the problem of calculating the residual life of LED lighting units is considered. Based on the presented block diagram of thermal processes, a system of differential equations of thermal processes in a LED lighting unit has been obtained. Thermal equivalent circuits for stationary and non-stationary operating modes have been developed. The solution of the system of differential equations for the stationary thermal mode by using the method of equivalent transformations allows deriving an expression for the total thermal resistance of the lighting unit and the temperature of  $p-n$ -junction in the LED. The formula has been obtained to calculate the residual life of the LED lighting unit. The calculation of the residual life for two operating modes of the lighting unit is presented.

#### Keywords:

light-emitting diode, light-emitting diode lighting unit, residual life, thermal resistance, temperature of  $p-n$ -junction.

Современные автоматические системы управления освещением выполняют следующие функции [1–3]:

– обеспечение коммуникаций, надежной связи между отдельными

устройствами, объединенными в единую систему;

– плавное адресное регулирование интенсивности света и, как следствие, уровня освещенности;

- реагирование на присутствие людей в помещении, где осветительные приборы подключены к автоматической системе управления освещением;

- поддержание заданного уровня освещенности;

- учет интенсивности естественного освещения;

- возможность управлять отдельными группами осветительных приборов, в зависимости от параметров предварительно установленного светового сценария;

- включение, выключение, корректировка интенсивности света по расписанию, в зависимости от дня недели и времени суток;

- возможность интеграции с системой «умный» дом или город.

Срок службы светодиодных осветительных установок не является статической величиной, зависимой от условий эксплуатации, и определяется температурным режимом  $p$ - $n$ -перехода кристалла светодиодов (СД). Температура  $p$ - $n$ -перехода кристалла является основным фактором, определяющим скорость

выхода из строя светодиодных осветительных установок. При оценке срока службы светодиодов момент выхода из строя определяется как снижение светового потока или яркости ниже определенного порога (25, 30 или 50 % – в зависимости от того, что понимает под окончанием срока службы каждый конкретный производитель) [4–6].

Методики определения срока службы светодиодов изложены в стандартах: ОСТ11-336.938–83 *Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность* – российском, LM-80, TM-21 – зарубежных (США) [7].

Согласно методике [8] ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов качественного изменения СД без изменения основных механизмов отказов. Коэффициент форсирования ускоренных операций  $K_y$  определяется энергией активации отказов по выражению [8]

$$K_y = \exp \left[ \left( \frac{E_a}{k} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{p-n}} + 273 \right) - \left( \frac{1}{T_{p-ny}} + 273 \right) \right],$$

где  $E_a$  – энергия активации отказов, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_{p-n}$  – температура  $p$ - $n$ -перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °С;  $T_{p-ny}$  – температура  $p$ - $n$ -перехода в ускоренном режиме испытаний, °С.

Номинальное время наработки  $T_{ном}$  (срок службы СД) определяют по выражению

$$T_{ном} = t_y \cdot K_y,$$

где  $t_y$  – время испытаний в ускоренном режиме.

Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 ч.

В известных источниках нет никакой конкретной информации об автоматизации расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок, применяющихся для наружного или внутреннего стационарного освещения.

В данной статье предлагается разработанная математическая модель тепловых процессов в светодиодной осветительной установке для оценки остаточного ресурса светодиодных осветительных установок.

**Расчет теплового сопротивления светодиода.** Расчет срока службы СД в осветительном устройстве выполним в соответствии с законом Аррениуса:

$$E(t)_i = A \cdot e^{-B \cdot T_i}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, характеризующие скорость теплового износа светодиода;  $T_{ji}$  – температура  $p$ - $n$ -перехода СД для  $i$ -го режима расчета.

Эта формула будет использована ниже в алгоритме расчета остаточного ресурса СД, где главным параметром, влияющим на остаточный срок службы СД, является температура  $p$ - $n$ -перехода  $T_j$ .

**Расчет температуры  $p$ - $n$ -перехода наиболее нагретой точки СД.** Для того чтобы определить величину  $T_j$ , необходимо знать три основных параметра:

1) суммарные потери активной мощности в светодиоде  $P_{\Sigma}$ , Вт;

2) полное тепловое сопротивление светодиодной установки  $R_{\Sigma}$ , °С/Вт;

3) температура окружающей среды  $T_a$ , °С.

Основная сложность заключается в определении теплового сопротивления светодиодной осветительной установки  $R_{\Sigma}$ . Для его расчета разработана тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки по аналогии с методом однородных тел, рассмотренным в [9, 10], когда изучаемый объект разбивается на относительно небольшое количество элементов с заданными тепловыми характеристиками. Структурная схема тепловых процессов светодиодной осветительной установки представлена на рис. 1.

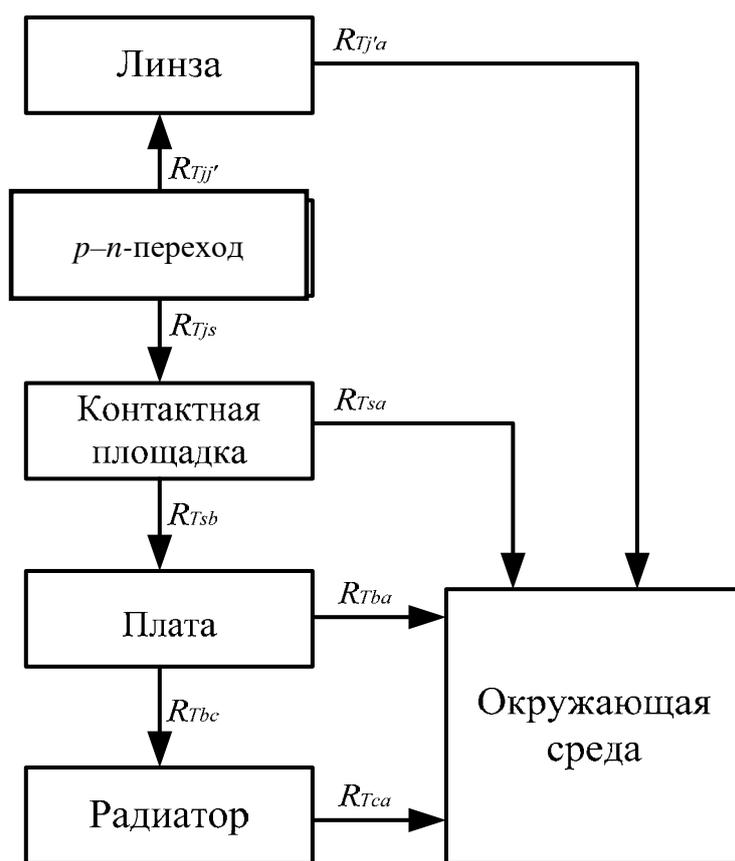


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов светодиодной осветительной установки

В приведенной на рис. 1 схеме каждый структурный элемент светодиодной осветительной установки представлен как тепловое однородное тело: линза,  $p$ - $n$ -переход СД, контактная площадка, плата, радиатор, окружающая среда. Обозначим сопротивления между ними:  $R_{Tjj'}$  – тепловое сопротивление «линза –  $p$ - $n$ -переход»;  $R_{Tj'a}$  – тепловое сопротивление «линза – окружающая среда»;  $R_{Tjs}$  – тепловое сопротивление « $p$ - $n$ -переход – контактная площадка»;  $R_{Tsa}$  – тепловое сопротивление «контактная площадка – окружающая среда»;  $R_{Tsb}$  – тепловое сопротивление «контактная площадка – плата»;  $R_{Tba}$  – тепловое сопротивление «плата – окружающая среда»;  $R_{Tbc}$  – тепловое сопротивление «плата – радиатор»;  $R_{Tca}$  – тепловое сопротивление «радиатор – окружающая среда».

На основании предложенной структурной схемы составлена система дифференциальных уравнений тепловых процессов для светодиодной осветительной установки:

$$\begin{cases} C_j \frac{dT_j}{dt} + \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'} + R_{Tj'a}} = P_{\Sigma}; \\ C_s \frac{dT_s}{dt} + \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_s - T_a}{R_{Tsa}} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} = 0; \\ C_b \frac{dT_b}{dt} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_b - T_a}{R_{Tba}} = 0; \\ C_c \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_c - T_a}{R_{Tca}} = 0; \\ C_{j'} \frac{dT_{j'}}{dt} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'}} + \frac{T_{j'} - T_a}{R_{Tj'a}} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $C_j \dots C_{j'}$  – теплоёмкости соответствующих однородных тел: линзы,  $p$ - $n$ -перехода СД, контактной площадки, платы, радиатора, окружающей среды соответственно, Вт·с/°С;  $T_j \dots T_c$  – температуры соответствующих однородных тел, °С;  $R_{Tjj'} \dots R_{Tca}$  – тепловые сопротивления соответствующих однородных

тел, °С/Вт;  $P_{\Sigma}$  – суммарные потери активной мощности в СД, Вт.

Температура внешней окружающей среды  $T_a$  определяется в результате измерений.

На основе системы дифференциальных уравнений составлена тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки, переходные процессы в которой полностью идентичны нестационарным тепловым процессам.

Тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки позволяет вести расчеты методами, применяемыми в электротехнике (рис. 2).

Основными частями светодиодной осветительной установки являются: корпус; радиатор, с закреплённым на нём СД; блок управления, соединённый с СД и датчиками температуры, установленными на корпусе установки, радиаторе, на излучающей поверхности, печатной плате и на корпусе СД [8].

В приведенной на рис. 2, а схеме потери мощности в первом однородном теле представлены в виде источника тока, а температура окружающей среды – в виде источника ЭДС.

Будем рассматривать стационарные тепловые режимы светодиодной осветительной установки (см. рис. 2, б). В этом случае все производные в системе уравнений (2) будут равны нулю. После ее преобразований получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'} + R_{Tj'a}} = P_{\Sigma}; \\ \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_s - T_a}{R_{Tsa}} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} = 0; \\ \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_b - T_a}{R_{Tba}} = 0; \\ \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_c - T_a}{R_{Tca}} = 0; \\ \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'}} + \frac{T_{j'} - T_a}{R_{Tj'a}} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

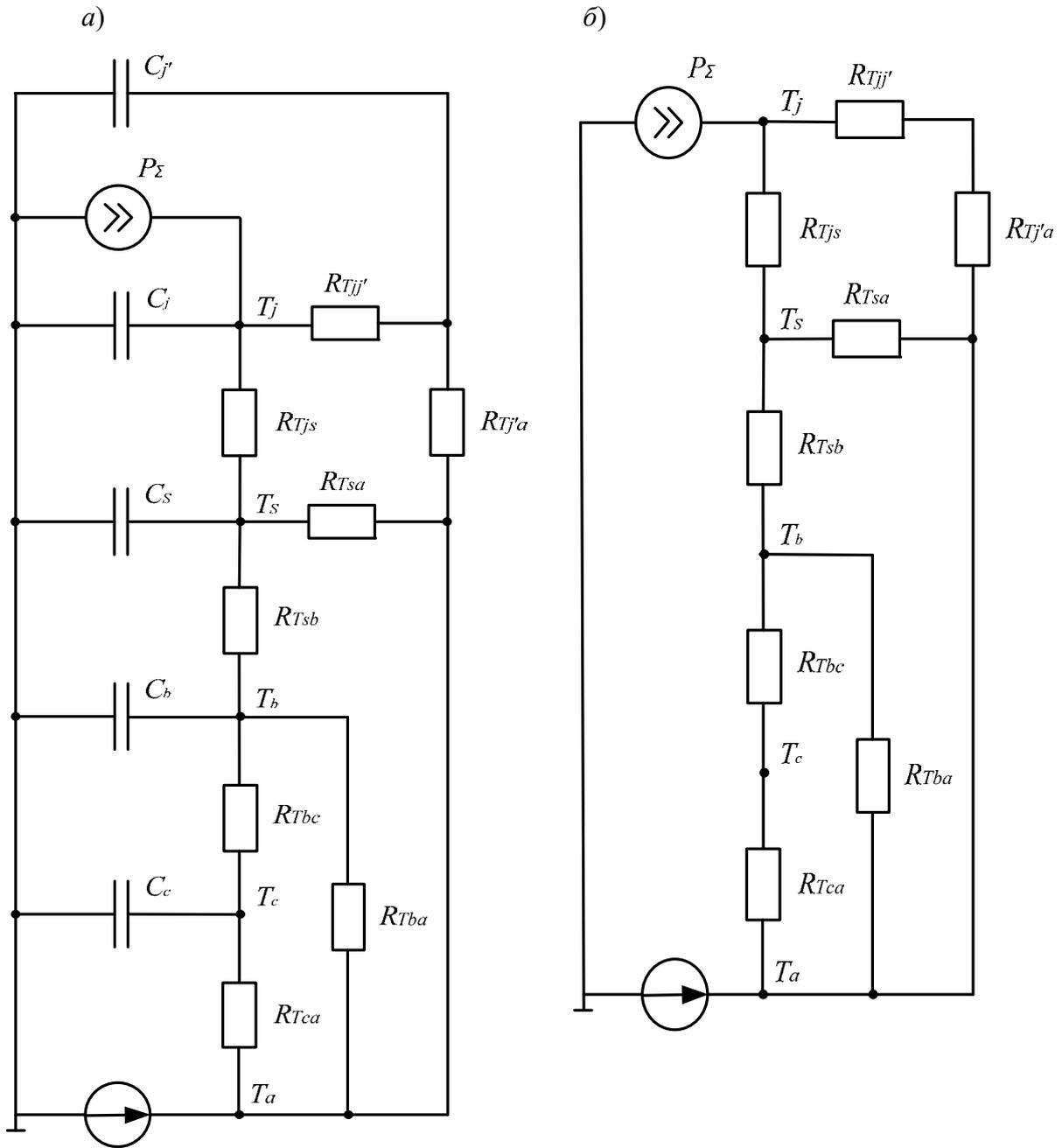


Рис. 2. Тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки: а – схема для нестационарных тепловых режимов; б – схема для стационарных тепловых режимов

Воспользовавшись методом эквивалентных преобразований, запишем выражение для определения суммарного теплового сопротивления  $R_\Sigma$ :

$$R_\Sigma = \frac{A \cdot R_{Tba} + B \cdot R_{Tsb} \cdot R_{Tsa} + B \cdot D \cdot K \cdot R_{Tjs}}{A \cdot R_{Tba} + B \cdot R_{Tsb} \cdot R_{Tsa} + A \cdot D \cdot G}, \quad (4)$$

где для упрощения записи были введены следующие замены:

$$A = R_{Tca} + R_{Tbc};$$

$$B = R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba};$$

$$K = R_{Tjj'} + R_{Tj'a};$$

$$G = R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba} + R_{Tsb} + R_{Tsa};$$

$$D = R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba} + R_{Tsb} + R_{Tsa}.$$

Тогда температура  $p$ - $n$ -перехода светодиодной осветительной установки определим по выражению

$$T_j = P_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} + T_a. \quad (5)$$

**Расчет остаточного ресурса.** Для того чтобы спрогнозировать остаточный ресурс светодиодной осветительной установки, используем коэффициент оптического и теплового износа  $f_i$ , который находится по выражению

$$f_i = \frac{E(t)}{E_{\text{норм}}}, \quad (6)$$

где  $E_{\text{норм}}$  – нормированное значение срока службы светодиода.

Тогда время выработки светодиодной осветительной установки за период дискретизации  $\Delta t$  равно

$$E_{\text{выр}} = \frac{\Delta t}{f_i}. \quad (7)$$

Остаточный ресурс определяем по выражению

$$E_{\text{ост}i} = \Delta t - E_{\text{выр}i}. \quad (8)$$

Тогда формула для расчета остаточного ресурса светодиодной осветительной установки будет иметь окончательное выражение:

$$\begin{aligned} E_{\text{ост}} &= E_{\text{норм}} - \sum_i E_{\text{ост}i} = \\ &= E_{\text{норм}} - \sum_i (\Delta t - E_{\text{выр}i}). \end{aligned} \quad (9)$$

**Пример расчета.** Для определения остаточного ресурса светодиодной осветительной установки из системы уравнений

$$\begin{cases} E_1 = A \cdot e^{-B \cdot T_1}; \\ E_2 = A \cdot e^{-B \cdot T_2} \end{cases}$$

находим коэффициенты  $A$  и  $B$ , характеризующие скорость теплового износа. Для значений  $E_1 = 250\,000$  ч и  $E_2 = 75\,000$  ч – срока службы СД по уровню снижения светового потока на 50 % при температурах  $p$ - $n$ -перехода кристалла СД  $T_1 = 61$  °С и  $T_2 = 84$  °С [6] получим  $A = 2777733,09$  ч и  $B = 0,0429$  1/°С.

Воспользовавшись расчётами мощности тепловых потерь – 0,67 и 1,65 Вт, температуры  $p$ - $n$ -перехода кристалла СД – 85 и 149 °С и теплового сопротивления  $p$ - $n$ -переход кристалла – окружающая среда (84 и 73 °С/Вт) для токов  $I_1 = 0,35$  А и  $I_2 = 0,7$  А для СД ARPL-3W6000 [11], определяем значения остаточного ресурса светодиодной осветительной установки (табл. 1). Из таблицы видно, что рассчитанные режимы работы светодиодного осветительного устройства подтверждают гарантированный срок службы, равный 50000 ч.

Для автоматизации определения остаточного ресурса в светодиодном осветительном устройстве устанавливается датчик температуры окружающей среды и микроконтроллер для контроля тока и напряжения.

Для передачи данных в компьютер микроконтроллер можно оснастить беспроводным интерфейсом связи, например, Wi-Fi.

Табл. 1. Результаты расчета остаточного ресурса светодиодной осветительной установки

Время $t$ , ч	Остаточный ресурс, ч	
	$E_{ост1}$ при $I_1 = 0,35$ А и $T_{j1} = 85$ °С	$E_{ост2}$ при $I_2 = 0,7$ А и $T_{j2} = 149$ °С
5000	45002,33	45000,15
10000	40004,66	40000,3
15000	35006,98	35000,45
20000	30009,31	30000,59
25000	25011,64	25000,74
30000	20013,97	20000,89
35000	15016,29	15001,04
40000	10018,62	10001,19
45000	5020,95	5001,33
50000	23,27	1,48

### Заключение

1. Разработана модель теплового режима работы светодиодной осветительной установки по аналогии с методом однородных тел.

2. Получены выражения для определения теплового сопротивления и

температуры  $p-n$ -перехода СД.

3. Проведен расчет остаточного ресурса светодиодной осветительной установки на основе СД ARPL-3W6000 для двух режимов работы с учетом коэффициента оптического и теплового износа.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гужов, С. В.** Перспективы использования светодиодных светильников [Электронный ресурс] / С. В. Гужов // Энергосбережение. – 2013. – № 1. – Режим доступа: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5444](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5444). – Дата доступа: 29.06.2020.
2. **Писарук, Т. В.** Системы автоматического управления освещением зданий [Электронный ресурс] / Т. В. Писарук, В. Б. Козловская // Актуальные проблемы энергетики: материалы СНТК 70. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/13712/>. – Дата доступа: 29.06.2020.
3. **Игнатов, С.** Автоматизация систем освещения: тенденции и прогнозы [Электронный ресурс] / С. Игнатов. – Режим доступа: <https://marketelectro.ru/content/avtomatizaciya-sistem-osveshcheniya-tendencii-i-prognozy>. – Дата доступа: 29.06.2020.
4. **ГОСТ Р 54814–2018.** Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения и связанное с ними оборудование. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Москва: Стандартинформ, 2018. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200160560>. – Дата доступа: 29.06.2020.
5. **ГОСТ Р 54815–2011/IEC/PAS 62612:2009.** Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В [Электронный ресурс]. – Москва: Стандартинформ, 2012. – Режим доступа: 1200095085.pdf. – Дата доступа: 29.06.2020.
6. Факторы срока службы светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vdmais.ua/news/factory-sroka-sluzhby-svetodiodov/>. – Дата доступа: 30.06.2020.
7. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов [Электронный ресурс] / В. С. Солдаткин [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sroka-sluzhby-svetodiodnyh-izluchayuschih-elementov>. – Дата доступа: 30.06.2020.
8. **ОСТ 11-336.938–83.** Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lbm.ru/techdocs/kgs/ost/1065/info/23239/>. – Дата доступа: 30.06.2020.

9. **Зализный, Д. И.** Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 5.

10. **Широков, О. Г.** Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств [Электронный ресурс] / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 2. – Режим доступа: <https://elibr.gstu.by/bitstream/handle/220612/13202>. – Дата доступа: 29.06.2020.

11. Калориметрический способ определения температуры активной области мощных светодиодов / Т. Н. Савкова [и др.] // Датский научный журнал. – 2018. – № 18. – С. 32–36.

*Статья сдана в редакцию 23 сентября 2020 года*

**Татьяна Николаевна Савкова**, магистр техн. наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: +375-447-03-90-47.

**Tatiana Nikolayevna Savkova**, MSc (Engineering), Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: +375-447-03-90-47.