

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ПО МАКСИМУМУ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РЕЗЕРВА ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА ВЕСОГАБАРИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ*

Л.С. Казаринов, В.И. Константинов, Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова

DESIGNING OF LIGHT-EMITTING DIODE LIGHT SOURCES ON THE MAXIMUM OF THE FUNCTIONAL RESERVE AT WEIGHT RESTRICTIONS

L.S. Kazarinov, V.I. Konstantinov, E.V. Vstavskaya, T.A. Barbasova

Решается задача оптимизации теплового режима осветительных приборов на основе светодиодных источников света и повышения их функционального резерва. Полученный функциональный резерв позволяет решить задачу компенсации процессов старения осветительных приборов в автоматическом режиме.

Ключевые слова: светодиод, светодиодный источник света, освещение.

In operation the task of optimization of a thermal mode of LED fixtures and increase of their functional reserve dares. The received functional reserve allows to solve the task of compensating of processes of aging of lighting instruments in an automatic mode.

Keywords: high power LED, light, LED lighting.

Особенности построения светодиодных светоизлучающих модулей

Поступательное развитие технологии производства электронных приборов привело в настоящее время к созданию светодиодов, которые по световой отдаче на единицу мощности в несколько раз превосходят все существовавшие и применявшиеся источники света. Следует отметить, что наибольших успехов в развитии технологии производства таких светодиодов добились фирмы OSRAM (Golden Dragon +), Cree (Q5) и Seoul Semiconductor. На текущий момент эффективность светодиодов составляет порядка 100–120 лм/Вт, анонсируются также изделия-приборы с интенсивностью 130–160 лм/Вт.

Учитывая, что такая светоотдача примерно в 6–8 раз эффективнее, чем у обычных ламп накаливания, и в 4 раза выше, чем у огромного количества энергосберегающих ламп (ртутных, натриевых, галогеновых и т. д.), возникает революционная ситуация в вопросах построения источников света для самого различного круга применений.

Осветительный светодиод представляет собой прибор со спектром излучения в высокочастотной области видимого диапазона (длина волны 400–500 нм – синий свет), накрытый куполом с люминофором, преобразующим излучение с указанной длиной волны в излучение с желтым свечением (~570 нм). Совокупность синего и желтого излучений формирует белое свечение, а баланс между

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Казаринов Лев Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Константинов Владимир Игоревич – доцент кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ; surel@ait.susu.ru

Вставская Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; surel@ait.susu.ru

Барбасова Татьяна Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; barbasow@mail.ru

Kazarinov Lev Sergeyevich – PhD, professor, head of the Automation and control department of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Konstantinov Vladimir Igorevich – assistant professor of the Equipment for information and measuring department of SUSU; surel@ait.susu.ru

Vstavskaya Elena Vladimirovna – PhD, assistant professor of the Automation and control department of SUSU; surel@ait.susu.ru

Barbasova Tatiana Alexandrovna – PhD, assistant professor of the Automation and control department of SUSU; barbasow@mail.ru

ними определяет его оттенок (холодный белый, чистый белый, теплый белый).

Однако светодиод остается светодиодом, и его свойствам присущи все особенности поведения обычного p - n -перехода под воздействием факторов окружающей среды. Среди основных эксплуатационных свойств, которые необходимо учитывать при проектировании светодиодных источников света и модулей питания, светодиодов, следует отметить:

1) ограниченный температурный диапазон работы p - n -перехода, составляющий $-60 \dots +150$ °C;

2) конечное значение теплового сопротивления элементов конструкции светодиода;

3) ограничение на допустимую температуру работы люминофора, превышение которой приводит к быстрой его деградации;

4) экспоненциальный характер зависимости тока, протекающего через светодиод, от приложенного напряжения;

5) отрицательное значение температурного коэффициента напряжения на переходе, т. е. снижение падения напряжения при том же токе при росте температуры перехода;

6) ограниченная величина допустимого обратного напряжения;

7) по сведениям производителей срок службы светодиодов составляет не менее 50 000 часов.

Следует отметить, что указанные параметры эффективности светоизлучения и долговечности работы сохраняются лишь при рабочей температуре перехода не выше 80–85 °C. Увеличение температуры выше этих значений приводит, с одной стороны, к уменьшению эффективности светоотдачи, с другой – к резкому сокращению срока службы светодиодов.

Перечисленные особенности светодиода как источника светового излучения определяют особенности его использования. Среди этих особенностей следует выделить:

1. Ограничение температуры излучающей поверхности при работе светодиода является определяющим фактором, поскольку влияет как на эффективность светоотдачи, так и на долговечность работы излучателя.

2. Конечное тепловое сопротивление элементов конструкции светодиода позволяет косвенно судить о температуре излучающей поверхности измерением температуры корпуса светодиода или радиатора.

3. Для получения больших значений светового потока необходимо построение мощных источников на базе объединения большого числа элементарных излучателей.

4. Для выравнивания энергетической нагрузки излучателей единственной схемой объединения может быть последовательное соединение, в рамках которого при едином фиксированном протекающем токе действует отрицательная обратная связь нормированного распределения мощностей.

Параллельное соединение светодиодов приводит к неравномерности распределения токов, поскольку вступает в действие положительная обратная связь, увеличивающая эту неравномерность. Использование выравнивающих резисторов при параллельном соединении светодиодов снижает энергетическую эффективность светодиодного излучателя и, следовательно, лишает светильник такого важного конкурентного преимущества, как высокая светоотдача.

5. Для сохранения высокой энергетической эффективности излучателя необходимо использование преобразователей с высоким КПД, т. е. реализующих импульсный способ преобразования энергии.

6. Выходной стабилизируемой величиной источника питания должен быть ток возбуждения светодиодов при условии, что рабочее напряжение может изменяться в пределах всего установленного температурного диапазона и количества светодиодов, на которое рассчитан данный источник.

7. Для обеспечения безотказной работы светильников и сохранения срока службы светодиодов на уровне, заявленном изготовителем, необходимо обеспечить требуемый теплоотвод, т. е. установить радиатор с требуемыми характеристиками теплоотдачи. Однако установка такого радиатора из условия работы при максимально допустимой температуре делает конструкцию светильника не оптимальной, поскольку для большей части жизненного цикла светильника такой радиатор оказывается переразмеренным (особенно для уличных применений). Учитывая, что при максимальных рабочих температурах окружающей среды ($+30 \dots +40$ °C) светильник работает крайне редко, а может быть и никогда, целесообразным является выбор радиатора из условия допустимой рабочей температуры окружающей среды на уровне $+20 \dots +25$ °C (а для северных районов еще ниже) и оснащение источника питания светодиодного излучателя системой контроля и ограничения температуры излучающей поверхности.

8. При использовании светодиодных светильников в автоматизированных или управляемых системах освещения необходимо иметь возможность внешнего управления интенсивностью светового потока с помощью установленного управляющего сигнала.

Анализ тепловых режимов светодиодных источников света

При производстве светодиодных источников света монтаж светоизлучателей осуществляется в два этапа:

1) монтаж светодиодов на теплопроводящее основание (подложку);

2) монтаж теплопроводящих оснований на охладитель.

Выбор светодиодов осуществлялся по следующим критериям:

1) отношении светового потока к потребляемой мощности;

2) совместимость с выбранным теплопроводящим основанием;

3) цена.

На рис. 1 представлена зависимость значения тока светодиода OSRAM LUW W5AM от падения напряжения на нем и зависимость нормированного значения светового потока $\Phi_V/\Phi_{V(350\text{mA})}$ светодиода от потребляемого тока I_F при температуре 25 °С.

Как видно из рис. 1, световой поток имеет логарифмическую зависимость от потребляемого тока. На рис. 2, а представлен график зависимости мощности светодиода от тока, протекающего через него, на рис. 2, б – график зависимости удельного светового потока от тока светодиода.

Из графика (рис. 2, б) видно, что удельный световой поток достигает максимума при токе светодиода 350 мА.

Расчет теплового сопротивления может быть осуществлен по формуле

$$R_{th} = \frac{T - T_1}{P},$$

где T – температура охлаждаемой поверхности; T_1 – температура окружающей среды; P – рассеиваемая мощность.

С другой стороны, тепловое сопротивление складывается из

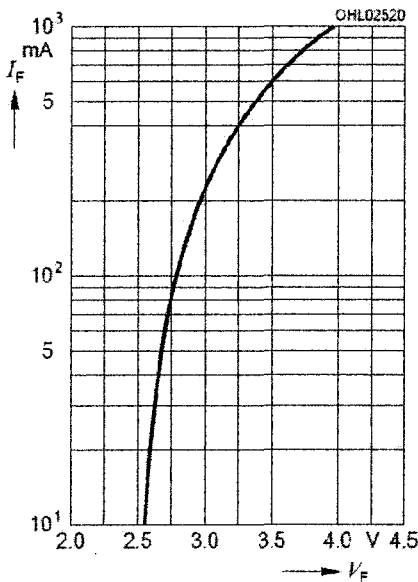
$$R_{th} = R_{th_{JS}} + R_{th_{SB}} + R_{th_{BA}},$$

где $R_{th_{JS}}$ – тепловое сопротивление перехода светодиода; $R_{th_{SB}}$ – тепловое сопротивление между корпусом светодиода и теплопроводящим основанием; $R_{th_{BA}}$ – тепловое сопротивление между теплопроводящим основанием и радиатором.

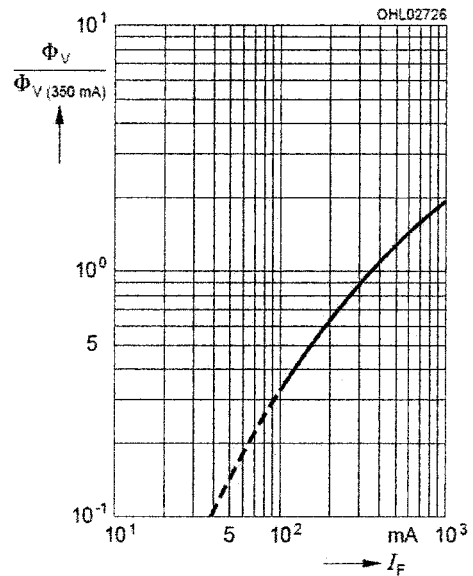
Полная мощность потребления светодиодного источника света определяется количеством n используемых светодиодных излучателей:

$$P_{total} = n \cdot P.$$

Чем больше потребляемый ток, тем больше требуемая площадь теплоотводящего радиатора. Потребляемый ток светодиодных излучателей может

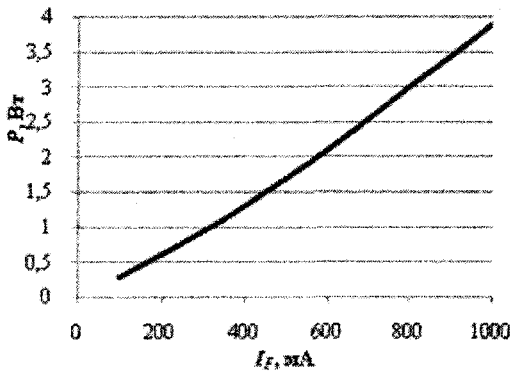


а)

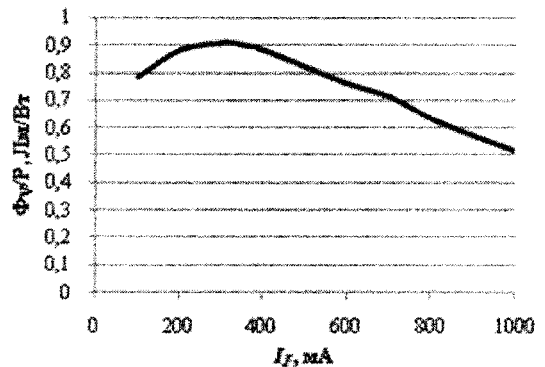


б)

Рис. 1. Зависимости светового потока от потребляемого тока



а)



б)

Рис. 2. Зависимости мощности светодиода от тока

достигать до 1 А. Однако в реальности используются меньшие значения тока, поскольку повышение тока потребления ведет к ухудшению температурных режимов работы светодиодных излучателей, увеличению площади радиатора, но не ведет к существенному увеличению светового потока.

Постановка и решение задачи проектирования светодиодных источников света с оптимальными весогабаритными и ценовыми характеристиками

Светодиодный источник света состоит из полупроводниковых тепловыделяющих элементов с нелинейными температурными свойствами.

При проектировании светодиодного источника света учитываются:

- 1) обеспечение требуемого значения светового потока;
- 2) допустимое уменьшение цены светильника;
- 3) уменьшение весогабаритных характеристик светильника.

Весогабаритные характеристики светильника определяются, в первую очередь, параметрами радиатора, требуемого для эффективного отведения тепла от светоизлучающих элементов.

Поскольку световой поток, излучаемый светодиодом, зависит от протекающего тока, вопрос построения теплоотвода с оптимальными весогабаритными характеристиками для тепловыделяющих элементов основывается на выборе оптимального диапазона потребляемого тока светодиодами при обеспечении рабочего режима теплоотведения радиатором.

Количество светодиодов, требуемое для обеспечения заданного светового потока, зависит от потребляемого тока. Так, при уменьшении потребляемого тока светодиодным источником света для обеспечения световых требований необходимо увеличивать количество светодиодов n (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что количество светодиодов, необходимых для обеспечения требуемого светового потока, нелинейно зависит от тока светодиодов. Увеличение количества светодиодов приводит,

в свою очередь, к удорожанию стоимости самого светодиодного светильника. Экономическая эффективность построения таких светодиодных светильников значительно снижается. В табл. 2 принят световой поток при токе 350 мА, равный 105 лм.

С другой стороны, увеличение потребляемого тока приводит к росту температуры перехода светодиода, что, в свою очередь, ведет к увеличению требуемой площади радиатора.

В соответствии с вышеизложенным, при проектировании светодиодных светильников возникает задача выбора для источника света токового диапазона работы для обеспечения оптимальных ценовых и весогабаритных характеристик.

Критериями оптимизации являются:

- обеспечение минимума себестоимости светодиодного светильника $\min [C_{\text{светильника}}]$;
- обеспечение минимума массы радиатора светодиодного светильника $\min [m_{\text{светильника}}]$;
- получение максимума функционального резерва $\max [R_{\text{светильника}}]$.

Допустимая температура перехода для применяемых светодиодов составляет 85 °С. Допустимую температуру контакта светодиода с теплоотводящей поверхностью можем рассчитать по формуле

$$t_{\text{КОНТАКТА}} = t_{\text{ПЕРЕХОДА}} - R_{th} \cdot P,$$

где $t_{\text{ПЕРЕХОДА}}$ – допустимая температура перехода (85 °С); R_{th} – тепловое сопротивление контакта светодиода с теплоотводящим основанием (примем $R_{th} = 11$ К/Вт); P – мощность светодиода.

Тепловое сопротивление радиатора можно определить по формуле

$$R_{th\text{РАД}} = \frac{t_{\text{КОНТАКТА}} - t_{\text{ОКР}}}{P_{\text{total}}},$$

где $t_{\text{ОКР}}$ – температура окружающей среды (принято 30 °С), P_{total} – мощность, потребляемая светодиодами светильника.

Из табл. 1 видим, что допустимая температура контакта уменьшается с ростом потребляемого тока. При увеличении потребляемого тока светодиодов происходит увеличение потребляемой

Требуемый световой поток 7000 лм

Таблица 1

$I_F, \text{ мА}$	$\Phi_V/\Phi_{V(350\text{мА})}$	n	$P, \text{ Вт}$	$P_{\text{total}}, \text{ Вт}$	$t_{\text{КОНТАКТА}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$R_{th\text{РАД}}, \text{ К/Вт}$	$m, \text{ кг}$
100	0,22	303	0,28	84,84	81,92	0,612	1,634
200	0,52	128	0,59	75,52	78,51	0,642	1,557
300	0,85	78	0,936	73,008	74,704	0,612	1,633
350	1	67	1,113	74,571	72,757	0,573	1,744
400	1,15	58	1,3	75,4	70,7	0,540	1,856
500	1,4	48	1,7	81,6	66,3	0,445	2,248
600	1,6	42	2,1	88,2	61,9	0,362	2,765
700	1,8	37	2,534	93,758	57,126	0,289	3,456
800	1,9	35	3	105	52	0,210	4,773
900	1,97	34	3,438	116,892	47,182	0,147	6,803
1000	2	33	3,9	128,7	42,1	0,094	10,636

мощности светильника. Обеспечение режима рассеивания увеличенной мощности светильника приводит к уменьшению требуемого теплового сопротивления радиатора. Уменьшение требуемого теплового сопротивления радиатора приводит к увеличению массы радиатора.

Для приближенного расчета массы требуемого радиатора примем, что радиатор с удельным тепловым сопротивлением $0,5 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ имеет массу 2 кг. В этом случае требуемая масса радиатора может быть рассчитана как

$$m = \frac{0,5 \cdot 2}{R_{\text{тРАД}}}$$

Увеличение массы радиатора приводит к росту себестоимости самого изделия светодиодного излучателя.

Таким образом, основными факторами, влияющими на результирующую стоимость светильника, являются цена радиатора и цена светодиодов:

$$C = C_{\text{СД}} \cdot n + C_{\text{РАД}}$$

где $C_{\text{СД}}$ – цена светодиода; $C_{\text{РАД}}$ – цена радиатора, которая, в свою очередь, определяется как

$$C_{\text{РАД}} = m \cdot C_{\text{кг}}$$

где $C_{\text{кг}}$ – цена за килограмм материала радиатора (принята 500 руб.).

В табл. 2 приведен расчет составляющих цены светодиодного источника света в зависимости от потребляемого тока (принята цена светодиода 160 руб.).

Из табл. 2 видно, что цена светильника нелинейно зависит от тока светодиодов (рис. 3).

Из графика (рис. 3) видно, что минимальная цена светильника 7650 руб. обеспечивается при токе светодиода, близком к 700 мА. Масса требуемого радиатора составит при этом около 3,5 кг.

Производство мощных светодиодных излучателей является перспективным направлением на сегодняшний день. Если принять значение светового потока одного светодиода фирмы OSRAM в размере 160 лм и снижение стоимости светодиода до 100 руб., что прогнозируется в ближайшее время, то примерный расчет стоимости светильника, обеспечивающего световой поток 7000 лм, потребует установки 24 светодиода. Потребляемая мощность светильника уменьшится до 61 Вт, а себестоимость по основным составляющим – до 3521 руб.

Помимо всего сказанного во время эксплуатации происходит снижение светового потока. На рис. 4 представлен график деградации светодиодов при проведении ускоренного теста продолжительности эксплуатации светодиодной системы.

Расчет составляющих цены светодиодного источника света

Таблица 2

$I_F, \text{ mA}$	На сегодняшний день					В перспективе				
	n	$m, \text{ кг}$	$C_{\text{СД}}, \text{ руб.}$	$C_{\text{РАД}}, \text{ руб.}$	$C, \text{ руб.}$	n	$m, \text{ кг}$	$C_{\text{СД}}, \text{ руб.}$	$C_{\text{РАД}}, \text{ руб.}$	$C, \text{ руб.}$
100	303	1,634	48480	817,03	49297,03	199	1,073	19900	536,5	20436,5
200	128	1,557	20480	778,40	21258,40	84	1,021	8400	510,5	8910,5
300	78	1,633	12480	816,57	13296,57	51	1,068	5100	534	5634
350	67	1,744	10720	872,03	11592,033	44	1,145	4400	572,5	4972,5
400	58	1,856	9280	926,29	10206,29	38	1,214	3800	607	4407
500	48	2,248	7680	1123,97	8803,97	31	1,451	3100	725,5	3825,5
600	42	2,765	6720	1382,45	8102,45	27	1,776	2700	888	3588
700	37	3,456	5920	1728,19	7648,19	24	2,242	2400	1121	3521
800	35	4,773	5600	2386,36	7986,36	23	3,135	2300	1567,5	3867,5
900	34	6,803	5440	3401,58	8841,58	22	4,405	2200	2202,5	4402,5
1000	33	10,64	5280	5318,18	10598,18	22	7,092	2200	3546	5746

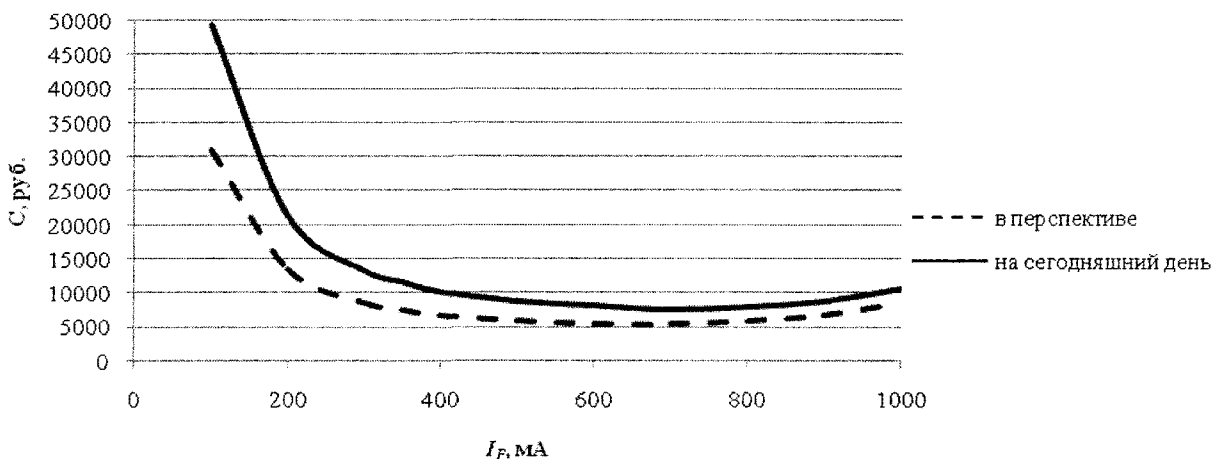


Рис. 3. Зависимость цены светильника от тока светодиодов

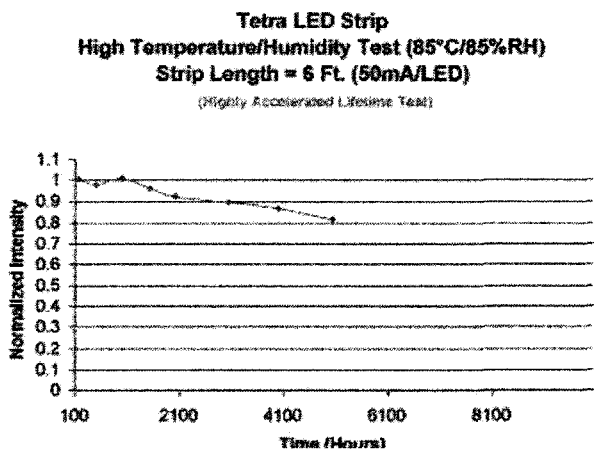


Рис. 4. Ускоренный тест продолжительности эксплуатации светодиодной системы [1]

Деградация интенсивности свечения при 85 °С и относительной влажности 85 % за 5 тыс. часов достигла 18 %.

Рассчитали, что оптимальным значением тока в светильнике, состоящем из 36 светодиодов, является ток в 700 мА, а масса радиатора при этом составляет 3,5 кг.

Так при уменьшении массы радиатора происходит увеличение температуры перехода на светодиодах, что приводит к значительному ухудшению световой отдачи светодиода. При увеличении массы радиатора возникает запас по температуре на светодиодах и соответственно по величине питающего тока.

Однако при увеличении потребляемого тока также происходит увеличение температуры на

светодиоде, что приводит к уменьшению срока службы светодиодного светильника.

За срок службы принимаем время, за которое светоотдача снижается на 20 % [2].

Так если рассматривать зависимость снижения светового потока от срока службы светильника, то при пропускиании через него максимально возможного тока и выборе оптимального весогабаритного размера радиатора в 3,5 кг, срок службы светильника (снижение светоотдачи на 20 %) составляет около 3700 часов или около года эксплуатации в системе уличного освещения (рис. 5, кривая 1).

Через год светильник стоимостью 15–25 тыс. рублей необходимо будет менять, так как из-за высокой температуры на теплоотводе произойдет деградация светодиода.

Если рассматривать вариант эксплуатации светодиодного источника света с оптимальным токовым и весогабаритным значением (см. кривую 2 на рис. 5), то световой поток снизится на 20 % за 17,5 тыс. часов.

При увеличении массы радиатора происходит улучшение теплоотвода и увеличивается срок службы светодиодного светильника. Увеличение массы радиатора до 4 кг увеличивает срок службы до 23 тыс. часов, увеличение массы до 6,4 кг – до 26 тыс. часов.

При увеличении массы радиатора происходит улучшение теплоотвода и увеличивается срок службы светодиодного светильника. Увеличение массы радиатора до 4 кг увеличивает срок службы до 23 тыс. часов, увеличение массы до 6,4 кг – до 26 тыс. часов.

Снижение светового потока

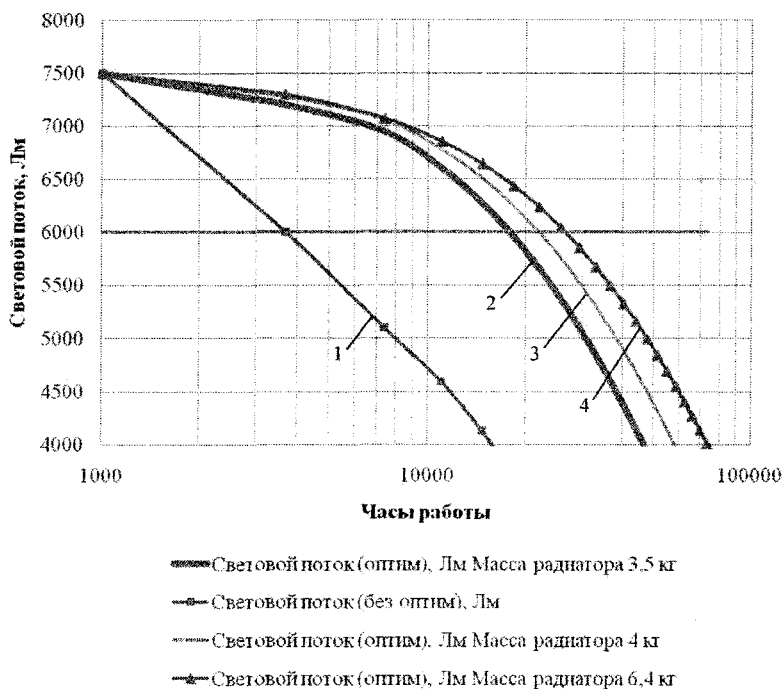


Рис. 5. Зависимость светового потока от времени работы

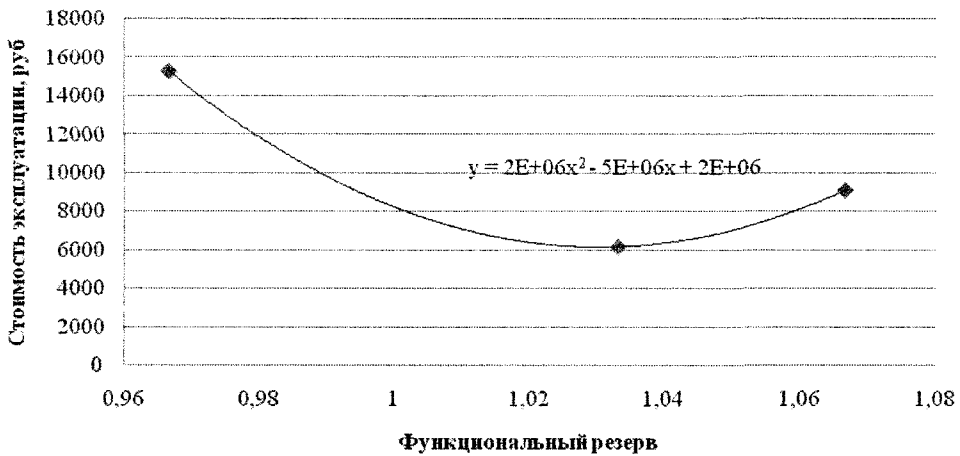


Рис. 6. Зависимость затрат от функционального резерва светильника на 20 тыс. часов работы системы

Функциональный резерв светодиодного источника света определяем как отношение светового потока источника к минимально допустимому световому потоку условиями эксплуатации. Функциональный резерв позволяет компенсировать ослабление светового потока в результате эксплуатации.

На рис. 6 представлена расчетная зависимость общих затрат на светодиодное освещение на одном светильнике с учетом его замены от текущего функционального резерва светодиодного светильника. Расчеты произведены для расчетной точки – 20 тыс. часов работы системы автоматического регулирования со светодиодным источником света.

Заключение

В работе предложена методика оптимизации весогабаритных характеристик для тепловыделяющих элементов с нелинейными температурными свойствами и повышения функционального резерва светодиодных излучателей. Данная методика применима для нахождения значения потребляемого тока светодиодным источником света с различными нелинейными характеристиками.

При определении оптимальных весогабаритных характеристик по критериям минимальной цены было получено значение потребляемого тока в размере 700–800 мА, при котором функция ценообразования имеет свой минимум.

Прогнозируемое развитие светодиодных излучателей ведет к уменьшению цены светодиодных источников света. Это подтверждает перспективность направления разработки светодиодных источников света и прогнозирует их доступность на широком рынке в ближайшее время. При этом оптимальное значение тока светодиодов сохраняется на уровне, близком к 700 мА.

Полученный функциональный резерв позволяет решить задачу компенсации процессов старения осветительных приборов (поддержание суммарного светового потока на заданном уровне в течение всего срока службы светильника) в авто-

матическом режиме, что способствует уменьшению затрат на проведение ремонтно-профилактического обслуживания светильников и повышению общего срока безотказной работы системы уличного освещения в целом.

Литература

1. Крис Бохлер. Возможности использования LED-систем в подсветке объемных букв. Технический обзор светодиодов // Наружная реклама России. – 2005. – № 7(102).
2. Коллман, Р. Эффективное управление питанием светодиодов / Р. Коллман // Светотехника оптоэлектроника. Электронные компоненты. – 2008. – № 3. – <http://elcp.ru>
3. <http://catalog.osram-os.com/catalogue/> LUW W5AM Golden DRAGON Plus with silicone dome.
4. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка опытного образца светодиодного источника света с регулируемым световым потоком» № госконтракта: 6922р/9457, № этапа: 2.1. Наименование НИОКР по этапу: «Исследование возможности построения теплоотвода с оптимальными весогабаритными характеристиками для тепловыделяющих элементов с нелинейными температурными свойствами», 2009 г.
5. Отчет о научно-исследовательской работе по 2 этапу Государственного контракта № П229 «Разработка энергоэффективных систем уличного освещения на базе светодиодных источников» (шифр «НК-66П») от 23 июля 2009 по направлению «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии» в рамках мероприятия 1.2.1, 2010 г.
6. Айзенберг, Ю.Б. Современные проблемы энергоэффективного освещения / Ю.Б. Айзенберг // Энергосбережение. – 2009. – № 1. – <http://www.soptel.ru/articles/release8.html>

Поступила в редакцию 21 декабря 2010 г.