

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА РАДИАТОРА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДА

Владимир Сергеевич Газалов  
Евгений Адимович Шабаев

Азово-Черноморский инженерный институт –  
филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде

Светодиоды (СИД) в качестве источников света активно внедряются в различных отраслях агропромышленного комплекса. Эффективность и срок службы светодиодных светильников и специальных электроустановок со светодиодами существенно зависят от температурного режима работы светоизлучающего кристалла СИД, поэтому особое внимание следует уделять обеспечению нормальной температуры работы светодиода. Около 80...90% потребляемой СИД электрической энергии преобразуется в тепловую, за счет которой происходит его нагрев. Эффективный отвод теплоты от кристалла СИД обеспечивают с помощью радиатора охлаждения. Тепловая инерционность радиатора в основном обуславливает динамику температуры СИД. На основе уравнения теплового баланса для одномерного объекта с сосредоточенными параметрами разработана модель радиатора, учитывающая изменение его теплового сопротивления в зависимости от температуры окружающего воздуха и температуры нагрева самого радиатора. С помощью специализированного ПО SimInTech проведено компьютерное моделирование процесса нагрева радиатора P-216, служащего для охлаждения трех RGB-светодиодов PL6N-3LFE с номинальной мощностью 3 Вт. В результате моделирования получены временные графики изменения температуры радиатора при постоянном и прерывистом режиме работы СИД. Для длительного включения светодиодов при достижении установившейся температуры в результате моделирования получены следующие значения: тепловое сопротивление радиатора  $R_{\text{QH}} = 5,187^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ; постоянная времени  $T = 338,7$  с; температура радиатора  $\theta_{\text{H}} = 62,3^\circ\text{C}$ . На основе полученных данных можно определить температуру R, G, B-кристаллов светодиода. При номинальных токах светодиода PL6N-3LFE его R, G, B-кристаллы нагреваются соответственно до 71, 76,  $75^\circ\text{C}$ , что является допустимым режимом их работы. Особый интерес представляет применение компьютерного моделирования процесса нагрева радиатора при изменении температуры воздуха и режима работы светодиода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: светодиод, радиатор охлаждения, модель радиатора, компьютерное моделирование, нагрев светодиода, динамика нагрева.

## SIMULATION OF THE HEATING PROCESS OF A RADIATOR APPLIED TOWARD THE SOLUTION OF PARTICULAR PROBLEMS OF LIGHT-EMITTING DIODE COOLING

Vladimir S. Gazalov  
Evgeny A. Shabaev

Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University

Light-emitting diodes (LEDs) as light sources are actively introduced in various sectors of the Agro-Industrial Complex. The efficiency and service life of LED lamps and special electrical installations with LED modules significantly depend on the operating temperature of the light-emitting diode crystal, so special attention should be paid to ensuring the normal operating temperature of the LED. About 80...90% of the electrical energy consumed by the LED is converted into heat, thus causing heating of the lamp. Efficient heat elimination from the LED crystal is provided by means of a cooling radiator. Radiator heat retention predominately determines the dynamics of the LED temperature. The authors on the basis of heat balance equation for one-dimensional object with lumped-constant parameters, developed a radiator model taking into account its thermal resistance fluctuations depending on the ambient air temperature and the heating temperature of the radiator itself; with the help of specialized SimInTech software carried out computer simulation of the heating process of the P-216 radiator intended for cooling three PL6N-3LFE RGB LEDs with 3 Wn watt nominal; obtained time profiles of radiator temperature fluctuations at constant and intermittent LED operation model; for continuous switching on LEDs operation, while arriving at steady-state temperature, obtained such values as radiator thermal resistance  $R_{\text{QH}} = 5,187^\circ\text{C}/\text{W}$ , time constant  $T = 338,7$  s, radiator temperature  $\theta_{\text{H}} = 62,3^\circ\text{C}$ . Based on the data obtained it is possible to determine the temperature of LED R, G, B-crystals.

B-crystals. At rated PL6N-3LFE LED currents its R, G, B-crystals are heated to 71, 76, 75°C, respectively, which is the permissible mode of their operation. Thus, computer simulation of radiator heating process is of primary concern at changes of air temperature and mode of LED operation.

KEYWORDS: light-emitting diode (LED), cooling radiator, radiator model, computer simulation, LED heating, heating dynamics.

### **В**ведение

Область применения твердотельных источников света в агропромышленном комплексе постоянно расширяется. Системы светодиодного освещения и облучения внедряют в тепличных хозяйствах, птицеводческих и животноводческих помещениях. Светодиодами активно заменяют традиционные источники света в специальных электроустановках. Это обусловлено снижением стоимости светоизлучающих диодов (СИД) и их отличительными особенностями: высокой световой отдачей, длительным сроком службы, широким диапазоном рабочих температур, низким питающим напряжением, экологичностью применения и др.

Светотехнические параметры излучения светодиода зависят от трех основных факторов: прямого тока, температуры активной области светоизлучающего кристалла и времени эксплуатации. Светодиод является токовым прибором, поэтому его питание необходимо осуществлять от источника тока. Для этого применяют светодиодные драйверы, которые обеспечивают стабилизацию тока на заданном уровне. Современные светодиоды способны работать при токах в 1,5...2,5 раза больше их номинального значения без существенного снижения эффективности. Важным условием сохранения работоспособности СИД и продолжительного срока его службы является обеспечение нормального температурного режима для светоизлучающего кристалла [4, 5]. Для длительного режима работы светодиода нормой считается температура 60...80°C, хотя кристалл может работать при температурах до 120°C. Несмотря на высокую эффективность СИД, около 80...90% потребляемой ими электрической мощности преобразуется в тепловую, за счет которой происходит нагрев светодиода. Для обеспечения эффективного отвода теплоты от кристалла необходимо использовать радиатор охлаждения [6].

Нагрев светоизлучающего кристалла до 70°C может вызвать снижение светового потока на 10...20% [1, 9]. Поэтому важной задачей проектирования светодиодных источников света является расчет рабочей температуры СИД. Определение температуры светоизлучающего кристалла является нетривиальной задачей для современной науки, поскольку измерить температуру активной области светоизлучающего кристалла прямым способом в работающем светодиоде затруднительно [3]. Для анализа температурного режима работы СИД можно воспользоваться современным методом исследования, базирующимся на компьютерном моделировании технических систем. При таком подходе необходимо иметь математические модели светодиода и радиатора охлаждения.

### **Разработка тепловой модели радиатора**

В качестве тепловой модели радиатора охлаждения светодиода с учетом ряда допущений можно использовать модель одномерного объекта с сосредоточенными параметрами. Математическое описание процесса нагрева, охлаждения такого объекта в первом приближении может быть представлено в виде дифференциального уравнения теплового баланса

$$mc \frac{d\theta}{dt} = \Delta P = P_{\Pi} - P_{O}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса объекта, кг;

$c$  – удельная теплоемкость материала объекта, Дж/(кг°C);

$\theta$  – температура объекта, °C;

$\Delta P$  – изменение тепловой мощности, изменяющей температуру  $\theta$ , Вт;

$P_{\Pi}$  и  $P_{O}$  – тепловая мощность, соответственно подводимая и отводимая от объекта, Вт.

Отводимый поток теплоты от объекта определяется выражением

$$P_O = \alpha S(\theta - \theta_0), \quad (2)$$

где  $P_O$  – тепловая мощность, отводимая от объекта, Вт;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи объекта, Вт/(м<sup>2</sup>°С);

$S$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\theta_0$  – температура окружающей среды, °С.

Используя выражение (2), уравнение (1) можно записать в виде

$$mc \frac{d\theta}{dt} = P_{\Pi} - \alpha S(\theta - \theta_0). \quad (3)$$

Разделив переменные в уравнении (3), получим

$$\frac{mc}{\alpha S} \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{1}{\alpha S} P_{\Pi} + \theta_0. \quad (4)$$

В установившемся режиме температура объекта рассчитывается через его тепловое сопротивление

$$\theta = R_Q P_{\Pi} + \theta_0, \quad (5)$$

где  $R_Q$  – тепловое сопротивление, °С/Вт.

Примем следующие обозначения:

$$k = R_Q = \frac{1}{\alpha S}; \quad T = \frac{mc}{\alpha S} = mcR_Q, \quad (6)$$

где  $k$  – передаточный коэффициент, °С/Вт;

$T$  – постоянная времени, с.

Тогда уравнение (4) можно записать в виде

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = k P_{\Pi} + \theta_0. \quad (7)$$

Применив преобразование Лапласа для уравнения (7), при  $\theta_0 = 0$  получим передаточную функцию  $W_2(s)$  объекта по каналу мощность – температура

$$W_2(s) = \frac{\theta(s)}{P_{\Pi}(s)} = \frac{k}{Ts + 1}. \quad (8)$$

Аналогично при  $P_{\Pi} = 0$  определяется передаточная функция  $W_1(s)$  объекта по каналу температура – температура

$$W_1(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_0(s)} = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (9)$$

Передача тепловой мощности от радиатора в окружающую среду осуществляется посредством конвекции и теплового излучения. На общий коэффициент теплоотдачи радиатора  $\alpha_H$  влияют: температура окружающей среды; температура радиатора; материал, из которого он изготовлен; обработка поверхности радиатора [2, 7]. В результате тепловое сопротивление радиатора  $R_{QH} = 1/(\alpha_H S_H)$  является термозависимой величиной. Таким образом, постоянная времени  $T$  и передаточный коэффициент  $k$ , определяемые уравнением (6), не являются постоянными величинами.

Проведенные расчеты по методике [7] для ребристого радиатора Р-216 с чернением гальваническим способом позволили получить график зависимости его теплового сопротивления  $R_{QH}$  от температуры радиатора  $\theta_H$  при температуре окружающего воздуха  $\theta_A = 20^\circ\text{C}$  (рис. 1). В диапазоне температур воздуха 10–50°С зависимости  $R_{QH}$  от температуры имеют характерный вид кривой, изображенной на рисунке 1.

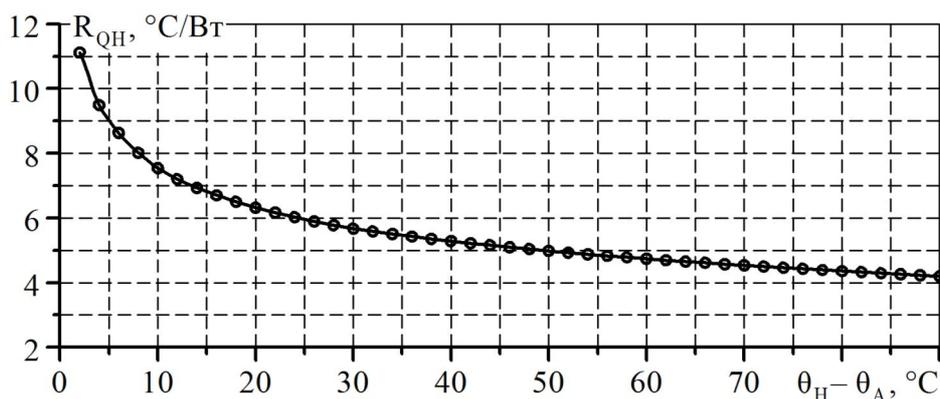


Рис. 1. Изменение теплового сопротивления радиатора Р-216 в зависимости от температуры радиатора при температуре воздуха 20°C

Методика расчета нагрева радиатора [7] не позволяет вывести простое аналитическое выражение, с помощью которого можно описать функциональную зависимость, приведенную на рисунке 1. В качестве такой математической модели при фиксированной температуре воздуха принято уравнение

$$R_{QH} = \frac{k_{H1}}{(\theta_H - \theta_A)^{k_{H2}}}, \quad (10)$$

где  $k_{H1}$ ,  $k_{H2}$  – коэффициенты модели.

Коэффициенты уравнения (10), определенные с помощью программы Statistica для температур воздуха 10–50°C, приведены в таблице.

Анализ коэффициентов модели (10) (см. табл.) указывает на их функциональную зависимость от температуры воздуха, которая выражается уравнением прямой

$$k_H = a_{H1} + a_{H2}\theta_A, \quad (11)$$

где  $a_{H1}$ ,  $a_{H2}$  – коэффициенты аппроксимирующей функции.

**Коэффициенты модели (10) и коэффициент детерминации**

$\theta_A, ^\circ\text{C}$	$k_{H1}$	$k_{H2}$	$R^2$	$\theta_A, ^\circ\text{C}$	$k_{H1}$	$k_{H2}$	$R^2$
10	13,937	0,25929	0,99950	32	12,943	0,25026	0,99735
12	13,858	0,25863	0,99938	34	12,858	0,24963	0,99709
14	13,777	0,25795	0,99926	36	12,771	0,24903	0,99683
16	13,695	0,25726	0,99915	38	12,681	0,24836	0,99668
18	13,607	0,25648	0,99905	40	12,578	0,24744	0,99641
20	13,508	0,25549	0,99894	42	12,471	0,24643	0,99607
22	13,406	0,25443	0,99876	44	12,364	0,24541	0,99569
24	13,305	0,25340	0,99853	46	12,257	0,24440	0,99529
26	13,206	0,25241	0,99826	48	12,151	0,24339	0,99486
28	13,112	0,25153	0,99794	50	12,045	0,24240	0,99439
30	13,027	0,25086	0,99762				

Коэффициенты уравнения (11), определенные с помощью программы Statistica, для  $k_{H1}$  и  $k_{H2}$  равны:  $a_{H11} = 14,44$ ;  $a_{H21} = -4,714 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_{H12} = 0,2637$ ;  $a_{H22} = -4,171 \cdot 10^{-4}$ ; коэффициенты детерминации – 0,99895 и 0,99665.

Таким образом, функциональная зависимость теплового сопротивления исследуемого радиатора от температур  $\theta_A$  и  $\theta_H$  описывается следующим уравнением:

$$R_{QH} = \frac{a_{H11} + a_{H21}\theta_A}{(\theta_H - \theta_A)^{a_{H12} + a_{H22}\theta_A}} = \frac{14,44 - 4,714 \cdot 10^{-2}\theta_A}{(\theta_H - \theta_A)^{0,2637 - 4,171 \cdot 10^{-4}\theta_A}}. \quad (12)$$

Структурная схема тепловой модели радиатора, построенной на основе модели одномерного объекта, может быть представлена в виде рисунка 2.

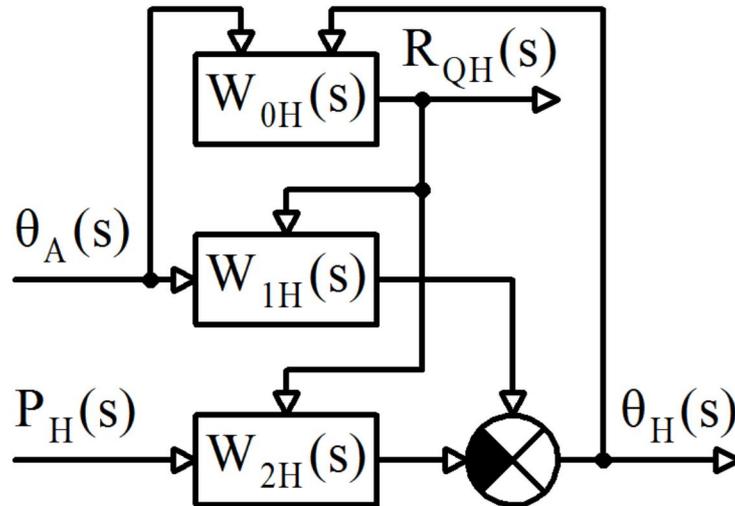


Рис. 2. Структурная схема тепловой модели радиатора

Передаточная функция  $W_{0H}(s)$  (рис. 2) определяется выражением (12), передаточные функции с переменными параметрами по каналу температура – температура  $W_{1H}(s)$  и каналу мощность – температура  $W_{2H}(s)$  должны учитывать изменение постоянных времени и передаточного коэффициента в зависимости от величины  $R_{QH}$  в соответствии с (6).

**Компьютерное моделирование**

Компьютерное моделирование процесса нагрева радиатора охлаждения светодиода проведено с помощью программы SimInTech [8]. Структурная схема моделирования процесса нагрева радиатора представлена на рисунке 3.

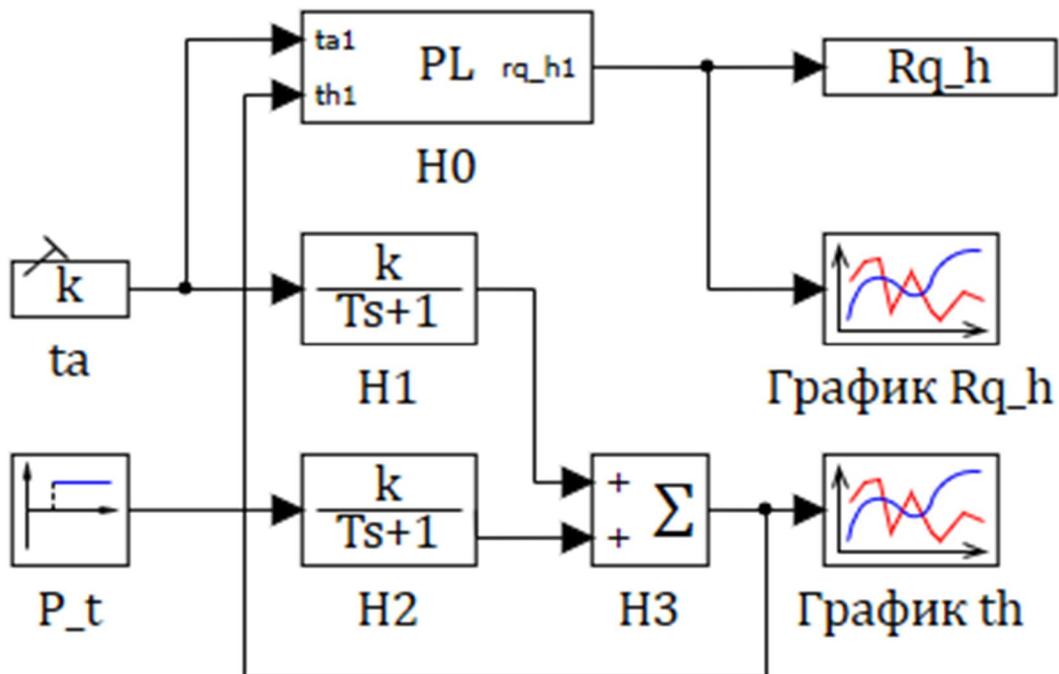


Рис. 3. Структурная схема моделирования процесса нагрева радиатора в среде SimInTech

Тепловая модель радиатора реализована блоками Н1, Н2, Н3 (рис. 3). Постоянные времени и передаточный коэффициент блоков Н1 и Н2 заданы через глобальные переменные  $k_h$  и  $T_h$  проекта в среде SimInTech (рис. 4). В скрипте главного окна проекта, представленном на рис. 4, также проводится задание и вычисление других переменных, необходимых для моделирования. Начальная температура радиатора  $th_0$  принята незначительно выше температуры окружающего воздуха, для исключения ошибки при начале расчета. Переменная  $th_0$  задает начальные условия для блока Н1.

Для охлаждения трех RGB-светодиодов PL6N-3LFE применен исследуемый радиатор [10], каждый из светодиодов при номинальных токах 350 мА выделяет 2,72 Вт тепловой мощности (рис. 4) при потребляемой электрической мощности 3,12 Вт [9].

```
1 // Температура окружающего воздуха, град.С
· ta=20;
· // Количество СИД, шт.
· N_led=3;
· // Тепловые мощности одного и нескольких СИД, Вт
· P_t1=2.72041; P_t=P_t1*N_led;
· // Начальная температура радиатора, град.С
· th0=ta+.001;
· // Параметры радиатора P-216:
10 // теплоемкость, Дж/(кг*град.С)
· C_h=65.304509472;
· // коэффициенты модели теплового сопротивления
· a_h11=14.4408848144007; a_h21=-.0471444759413795;
· a_h12=.263677388741889; a_h22=-.000417059969397899;
· // передаточный коэффициент (град.С/Вт), постоянная времени (с)
· k_h=Rq_h; T_h=C_h*Rq_h;
```

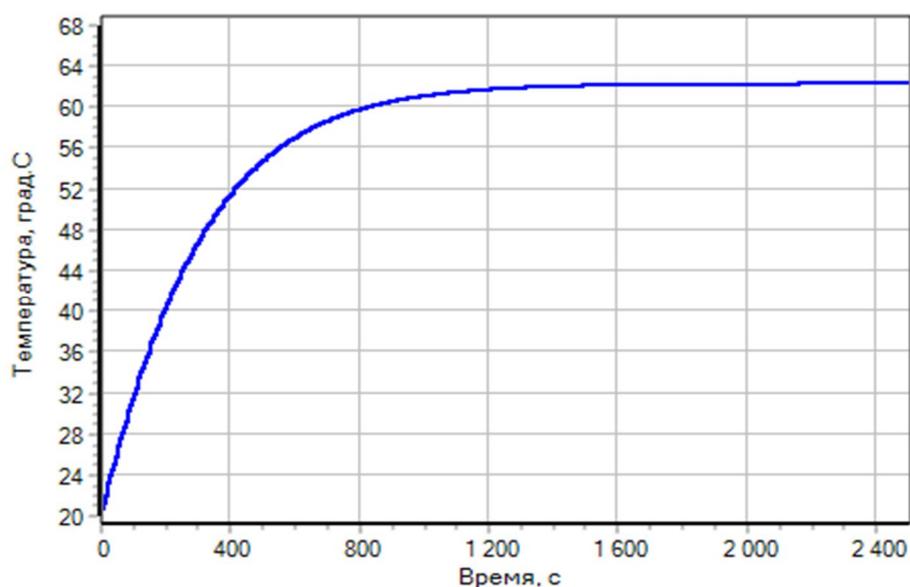
Рис. 4. Содержание скрипта главного окна проекта

Расчет теплового сопротивления радиатора в соответствии с выражением (12) осуществляется с помощью блока Н0 типа «Язык программирования» (рис. 3). Выходная переменная данного блока задает значение для глобальной переменной  $Rq_h$ , являющейся сигналом проекта.

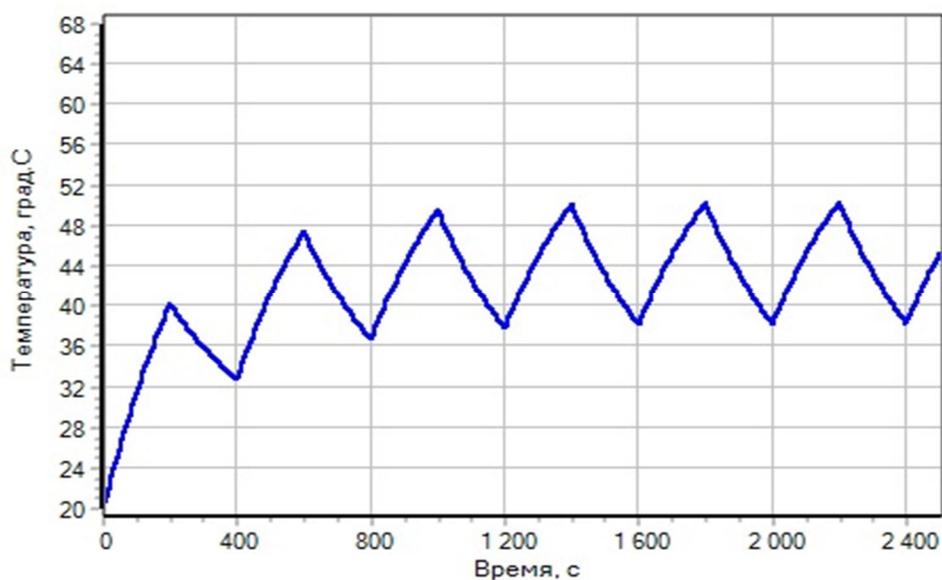
Вывод графиков временных зависимостей теплового сопротивления радиатора и его температуры осуществляется блоками «График  $Rq_h$ » и «График  $th$ » типа «Временной график» (рис. 3).

### Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования процесса нагрева радиатора представлены на рисунке 5.



а



б

Рис. 5. Динамика нагрева радиатора: а – при постоянной работе светодиода; б – в режиме прерывистой работы светодиода

Выход на установившуюся температуру при постоянной работе светодиода происходит за 14 мин. (рис. 5, а). В течение этого времени (без учета первых нескольких секунд) тепловое сопротивление радиатора изменяется более чем в 2,5 раза. Для установившегося режима получаем следующие результаты моделирования: тепловое сопротивление радиатора  $R_{QH} = 5,187^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ; постоянная времени  $T = 338,7$  с; температура радиатора  $\theta_H = 62,3^\circ\text{C}$ .

С учетом известных значений тепловых сопротивлений «светоизлучающий кристалл – теплоотводящая подложка» [10] и «теплоотводящая подложка – радиатор» становится возможным определение температур R, G, В-кристаллов светодиода. При номинальных токах светодиода PL6N-3LFE его R, G, В-кристаллы нагреются соответственно до температур 71, 76, 75 $^\circ\text{C}$ , что является допустимым режимом их работы.

Графики изменения теплового сопротивления радиатора в процессе его нагрева приведены на рисунке 6.

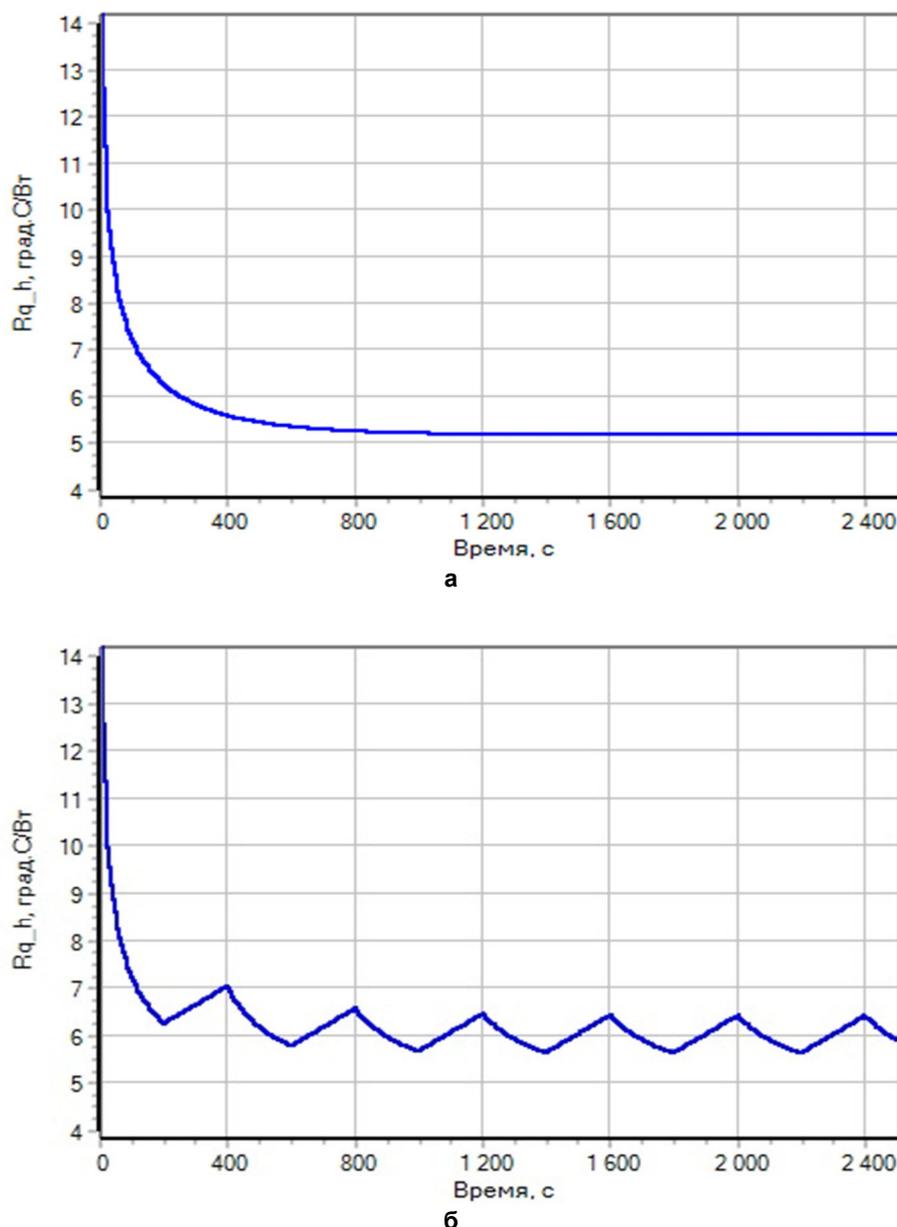


Рис. 6. Изменение теплового сопротивления радиатора: а – при постоянной работе светодиода; б – в режиме прерывистой работы светодиода

Результаты моделирования для примера прерывистой работы светодиода (включен 200 с, выключен 200 с) представлены на рисунках 5, б и 6, б. Температура радиатора колеблется в пределах 38,2...50,3°C (рис. 5, б), что приводит к заметным изменениям его теплового сопротивления (рис. 6, б).

### Заключение

Разработанная модель радиатора, применяемого для охлаждения светодиода, и специализированное ПО SimInTech позволяют провести компьютерное моделирование процесса нагрева радиатора во времени с учетом влияния температуры окружающего воздуха и температуры самого радиатора. На основе полученных результатов моделирования можно произвести оценку теплового режима работы светодиода.

Динамика нагрева и охлаждения светодиода в основном определяется тепловой инерционностью его радиатора, поэтому особый интерес представляет применение компьютерного моделирования процесса нагрева радиатора при изменении температуры воздуха и режима работы светодиода.

### Библиографический список

1. Влияние Джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов / А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Д.А. Лавринович, Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 5. – С. 621–627.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник / Г.Н. Дульнев. – Москва : Высшая школа, 1984. – 247 с.
3. Методика исследования и контроль тепловых процессов в светодиодах / С.И. Лишик, С.Ю. Никитин, В.С. Поседько, Ю.В. Трофимов, В.И. Цвирко // Светотехника. – 2007. – № 5. – С. 20–24.
4. Никифоров С.Г. Температура в жизни и работе светодиодов. Ч. 1 / С.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 48–54.
5. Никифоров С.Г. Температура в жизни и работе светодиодов. Ч. 2 / С.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2006. – № 1. – С. 18–23.
6. Николаев Д. Основы теплового менеджмента при конструировании ПСП / Д. Николаев, А. Фелопентов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – Т. 1, № 3. – С. 44–47.
7. Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов / Ю.Ф. Скрипников. – Москва : Энергия, 1973. – 48 с.
8. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабает, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
9. Шабает Е.А. Анализ эффективности светодиодов в рабочем диапазоне температур / Е.А. Шабает // Вестник аграрной науки Дона. – 2008. – № 4. – С. 39–47.
10. ProLight PL6N-3LFX 3W RGB Power LED : Technical Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.datasheets360.com/pdf/-4604148972362275037> (дата обращения: 16.01.2019).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Сергеевич Газалов – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрной университет» в г. Зернограде, Россия, г. Зерноград, e-mail: gazalv@rambler.ru.

Евгений Адимович Шабает – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрной университет» в г. Зернограде, Россия, г. Зерноград, e-mail: sea007@rambler.ru.

Дата поступления в редакцию 14.07.2019

Дата принятия к печати 28.08.2019

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir S. Gazalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Operation of Power Equipment and Electric Machines, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University, Russia, Zernograd, e-mail: gazalv@rambler.ru.

Evgeny A. Shabaev, Candidate of Agricultural Sciences, Docent, the Dept. of Operation of Power Equipment and Electric Machines, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University, Russia, Zernograd, e-mail: sea007@rambler.ru.

Received July 14, 2019

Accepted August 28, 2019