

М. Тарасенко. Особливості електричних, світлотехнічних та експлуатаційних характеристик напівпровідникових джерел світла / М. Тарасенко, К. Козак // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 72. — № 4. — С.227-237. — (приладобудування та інформаційно-вимірвальні технології).

УДК 621.396.218

М. Тарасенко, докт. техн. наук; К. Козак

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ, СВІЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Резюме. На основі аналізу та узагальнення отриманих експериментальних даних побудовано алгебраїчну математичну модель електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла. Встановлено, що світловипромінюючі діоди є єдиним з існуючих джерел світла, в яких у процесі перехідного процесу розгорання відбувається падіння як світлового потоку, так і світлової віддачі, а при дімуванні – зростання світлової віддачі.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, світловий потік, світлова віддача, напівпровідникові джерела світла, ретрофитні джерела світла.

М. Tarasenko, K. Kozak

CHARACTERISTIC FEATURES OF ELECTRIC, LIGHTING AND OPERATION PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR LIGHT SOURCES

Summary. Basing on the analysis and generalization of the obtained and published experimental data there has been constructed an algebraic mathematical model of semiconductor light sources' electrical and lighting parameters in the form of five interrelated equations. It has been established that light emitting diodes are the only existing light sources, in which a decrease in both the luminous flux and luminous efficacy takes place during the transition process of glow, while under that of dimming – an increase of the light output. It has been proved that the dynamics of the transition process of the decrease of the luminous flux of semiconductor light sources from the moment of switching to the moment of transition into a steady state regime (with accuracy sufficient for practical purposes) is described by the difference of decreasing and increasing exponential functions of constants of time and integration of various magnitude, which make possible to evaluate the contribution of each transient thermal resistance (the base of light emitting diode-radiator, radiator-environment) to the process of the excessive heat transfer from a driver and LEDs to the environment. It has been proved, that the decrease of the luminous flux during the transition process from the moment of switching to the transition into the steady state regime within 10% range testifies the fact, that under this condition of thermal regime of a lighting product the average duration of the light emitting diode glow will be close to the nominal value claimed in the specifications and technical documentation. The 10% value excess of the luminous flux decrease indicates the light emitting diodes' p-n junction overheating above the allowable level, at which both the luminous efficiency and average duration of glow will be lower than stated. There has been developed a method of determining an optimal value of nominal current generated on the basis of LED lighting products in terms of providing the necessary magnitude of an average duration of glow based on the investigation of dependence of the relative decrease of their luminous flux on the current from the moment of switching to the transition into the steady state regime, which make impossible to develop and produce substandard products.

Key words: voltage-current characteristics, luminous flux, luminous efficiency, semiconductor light sources, retrofit light sources.

Постановка проблеми. На сьогодні одним з найактуальніших завдань для будь-якої сучасної держави є питання енергоощадності. В світлотехнічній галузі це пов'язано з упровадженням енергоекономічних систем освітлення. Останнім часом це все більше і більше асоціюється з упровадженням четвертого (за всю історію людства) покоління джерел світла – потужних напівпровідникових світлодіодів і освітлювальних систем, побудованих на їхній основі. Головною відмінністю напівпровідникових джерел світла (НДС) від традиційних є застосування абсолютно іншого принципу отримання світла (генерування квантів світлової енергії під час рекомбінації електронно-дірочних пар в *p-n* переході), при якому корпус, лінзи, радіатор і драйвер є

невід’ємними їхніми складовими. При цьому для ефективного розсіювання кожного надлишкового вата тепла необхідно від 80 до 100 гр ваги радіатора й низькі теплові опори в місцях контактів. Недотримання цих вимог призводить до надмірного зростання температури $p-n$ переходу, від якої безпосередньо залежать такі складові параметри енергоефективності світлодіодних виробів, як середня тривалість світіння (СТС), спад і стабільність світлового потоку в процесі розгорання та експлуатації, надійність та споживана потужність.

Аналіз останніх літературних джерел та публікацій [1, 2, 3] показав, що основною математичною моделлю напівпровідникових діодів є модель Еберса-Молла, яка дає можливість будувати їхні ампер-вольтні характеристики. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) напівпровідникових ДС (НДС) нелінійна. Діод починає проводити струм, починаючи з деякої порогової напруги. Ця напруга дозволяє досить точно визначити матеріал напівпровідника. У зв’язку з тим, що світловипромінюючі діоди, які відносяться до діодів з товстою базою (товщина бази в багато разів перевищує дифузійну довжину неосновних носіїв заряду), виготовляються на основі матеріалів з великою шириною забороненої зони, опір бази можна вважати таким, що не залежить від струму. Тоді при умові експоненціальної залежності граничної концентрації неосновних носіїв біля $p-n$ переходу від напруги рівняння ампер-вольтних характеристик напівпровідникових діодів з товстою базою можуть бути представлені у вигляді

$$I = I_s \cdot \left[\exp \frac{e \cdot (U - I \cdot R_A)}{k \cdot T} \right], \quad (1)$$

де I – біжуче значення струму через діод, А;

I_s – струм насичення (або зворотний струм) діода, А;

e – заряд електрона, $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл;

R_A – опір бази напівпровідникового діода, Ом;

k – стала Больцмана, $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

T – температура $p-n$ переходу, К.

Але у більшості випадків при напругах на $p-n$ переході, близьких до значень контактної різниці потенціалів, опір бази при зміні струму не залишається незмінним і тому хід ВАХ відхиляється від експоненціального, що ускладнює процес визначення реальної динаміки їхньої зміни. Це змушує дослідників звертатися до експериментальних методів визначення зазначених закономірностей.

Саме тому **метою даної статі** й стало вивчення відмінностей електричних і світлотехнічних характеристик НДС від подібних їм для традиційних джерел світла.

Результати досліджень. У більшості публікацій ампер-вольтні характеристики як звичайних напівпровідникових діодів, так і напівпровідникових ДС називають вольт-амперними. З методологічної точки зору це не правильно. Враховуючи це, ми будемо досліджувати саме ВАХ (рис. 1), з яких добре бачимо, зростаюча вона чи падаюча для розглядуваного ДС. Усі отримані залежності, наведені на рис. 2,3,5, є нормованими на основі застосування формули $X_i = X / X_N$, де X_i, X, X_N – нормоване, біжуче та номінальне значення відповідної величини. Усі зразки досліджувалися за однаковою методикою. Дослідження проводилися при однакових умовах. Для забезпечення відтворюваності **результатів експериментальних досліджень** кількість джерел світла, згаданих у тексті кожної із згаданих груп, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена була прийнята рівною шести.

Аналіз як отриманих нами, так і опублікованих в різних виданнях даних щодо вигляду ВАХ білих і різнокольорових світлодіодів показав (рис. 1), що хід їхніх віток помітно відрізняється залежно від кольору випромінювання [4]. Це пояснюється тим, що їх виготовляють на основі різних напівпровідникових матеріалів і саме тому мають різну ширину забороненої зони, а відповідно й різну висоту потенціального бар'єра на *p-n* переході.

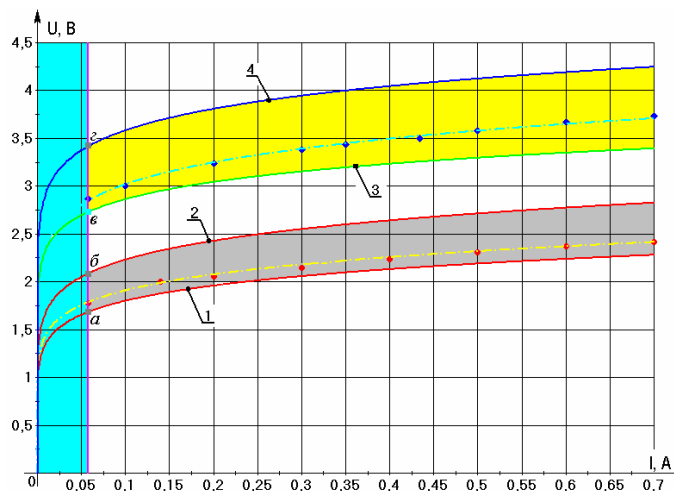


Рисунок 1. Зони вольт-амперних характеристик для різнокольорових НДС серії С503: між кривими 1 – 2 для червоних і жовтих; між кривими 3 – 4 для зелених, голубих, синіх і білих

Figure 1. Zone of voltage-current-characteristics for colorful SLS series S503: between curves 1 – 2 for the red and yellow; between curves 3 – 4 for green, light-blue, blue and white

зосереджені в першій зоні, обмеженій кривими 1 і 2, а зелених, голубих, синіх і білих – у другій зоні, обмеженій кривими 3 і 4.

Для того, щоб з'явився прямий струм, необхідно зменшити висоту потенціального бар'єра, приклавши до *p-n* переходу пряму напругу, близьку до контактної різниці потенціалів ϕ_k , яка визначає величину нечутливої зони і називається пороговою. З моменту досягнення порогової напруги струм починає стрімко збільшуватися. В *p-n* переході на основі германію $\phi_k = (0,3-0,4)$ В, на основі кремнію $\phi_k = (0,6-0,8)$ В, а в напівпровідникових ДС ϕ_k залежить від кольору випромінювання (матеріалу напівпровідника) точки *a, б, в, г* на рис. 1 та серії (див. табл. 1). Саме тому прямі вітки ВАХ згаданих діодів і світлодіодів зміщені вгору (рис. 1). ВАХ червоних і жовтих світлодіодів

зміщені вгору (рис. 1). ВАХ червоних і жовтих світлодіодів

Таблиця 1

Параметри різнокольорових НДС [4]

Серія LED	Колір	Типова λ , нм	Пряме зниження напруги, В		Відхилення сили світла від типового значення для кутів випромінювання, %			
			Серія С503	Серія Р42	15°	Типове значення	30°	Типове значення
Серія С503	червоний	624	2,1-2,6	2,5-3,0	- 51 ...+ 96	від 12000 kd	- 47 ...+ 135	від 5100 kd
Серія С503	жовтий	591	2,1-2,6	2,5-3,0	- 55 ...+ 81	від 13000 kd	- 47 ...+ 135	від 5100 kd
Серія С503	зелений	527	3,2-4,0	3,6-4,4	- 51 ...+ 90	від 34000 kd	- 53 ...+ 88	від 12500 kd
Серія С503	блакитний (синій)	470 (457)	3,2-4,0	3,6-4,4	- 47 ...+ 114	від 11000 kd	- 48 ...+ 100	від 4100 kd
Серія С503	білий	-	3,2-4,0	3,6-4,4	- 30 ...+ 37	від 24000 kd	- 38 ...+ 82	від 9000 kd

З графіків рис. 2, побудованих на основі експериментальних даних, бачимо, що у теплових ДС зростаючою є не тільки ВАХ (крива 3), але й динамічний (крива 6) та статичний (крива 9) опори. Це свідчить про те, що ці ДС можна вмикати в мережу без будь-якої пускорегулювальної апаратури й просто здійснювати регулювання світлового потоку від максимально можливого значення до нуля. При цьому максимально можливе значення не може перевищувати номінальне більше ніж удвічі у зв'язку з нищівним впливом перенавантажень на СТС. При живленні ТДС напругою, яка на 20% перевищує її номінальне значення, СТС зменшується більше ніж у 10 разів.

У розрядних лампах низького (люмінесцентних) і високого (типу ДРЛ, ДНаТ і ДРІ) тиску ВАХ падаючі (крива 2 на рис. 2). Падаючими є й їхні статичний (крива 8) та

від'ємний динамічний (крива 5, яка наведена на рис. 2 по модулю, як дзеркальне відображення реальної залежності відносно осі абсцис) опори. Це вказує на те, що для роботи таких ДС обов'язково потрібна пускорегулювальна апаратура (струмообмежувальний баласт і запалювальний пристрій).

Регулювання світлового потоку в широких межах (від максимального значення, яке не може перевищувати номінальне більше ніж на 20% у зв'язку з відчутним падінням СТС (приблизно на 30%) і до значень, притаманних струмам, у п'ять разів менших від номінальних, при яких виникають страти [5]), можливе лише для розрядних ламп низького тиску, за умови застосування спеціальних схем, які б забезпечували під-

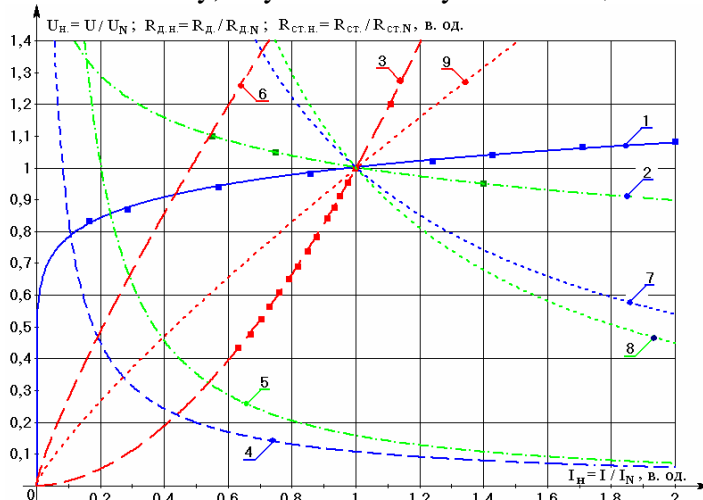


Рисунок 2. Нормовані вольт-амперні характеристики ($U_n = f(I_n)$): 1 – напівпровідникових; 2 – розрядних; 3 – теплових ДС, а також їхні динамічні ($R_d = f(I_n)$) 4, 5, 6 та статичні ($R_d = f(I_n)$) 7, 8, 9 опори відповідно

Figure 2. Normalized voltage - current- characteristics ($U_n = f(I_n)$): 1 – semiconductor; 2 – discharge; 3 – thermal LS and also their dynamic ($R_d = f(I_n)$) 4, 5, 6 and static ($R_d = f(I_n)$) 7, 8, 9 resistance accordingly

тримання напруги на номінальному рівні й постійне підігрівання катодів люмінесцентних ламп для забезпечення високої термоелектронної емісії з них при зменшенні розрядного струму.

Регулювати світловий потік розрядних ламп високого тиску набагато складніше. Це зумовлено суттєвою відмінністю конструкції електродів для розрядних ламп високого тиску від конструкції електродів для люмінесцентних ламп. Якщо у люмінесцентних лампах електро-ди двоштиркові, то у розрядних – одноштиркові. Це виключає можливість забезпечення високої

термоелектронної емісії з катодів шляхом їх підігрівання від стороннього джерела енергії під час регулювання світлового потоку. Тому глибина регулювання світлового потоку не перевищує 30 – 50 % від номінального значення і на високих частотах часто супроводжується акустичним резонансом [6].

У напівпровідникових ДС ВАХ (крива 1 на рис. 2 та всі залежності на рис. 1) зростаюча, але має нечутливу зону від 0,0 до 0,6 на осі ординат (напруг). Динамічний (крива 4) та статичний (крива 7) опори додатні й з підвищенням струму зменшуються за гіпербо-лічним законом. Тому для них потрібні високостабільні джерела живлення (драйвери). В зв'язку з тим, що в околицях номінальних значень електричних параметрів НДС однопроцентна зміна напруги живлення призводить до десяти-процентної зміни струму, драйвери повинні бути стабілізаторами струму, а не напруги.

Аналіз отриманих експериментальних даних також показав, що прямі вольт-амперні (2) та ампер-вольтні (3) характеристики всіх без винятку НДС відрізняються від відповідних характеристик звичайних напівпровідникових діодів і добре описуються наступними степеневими функціями

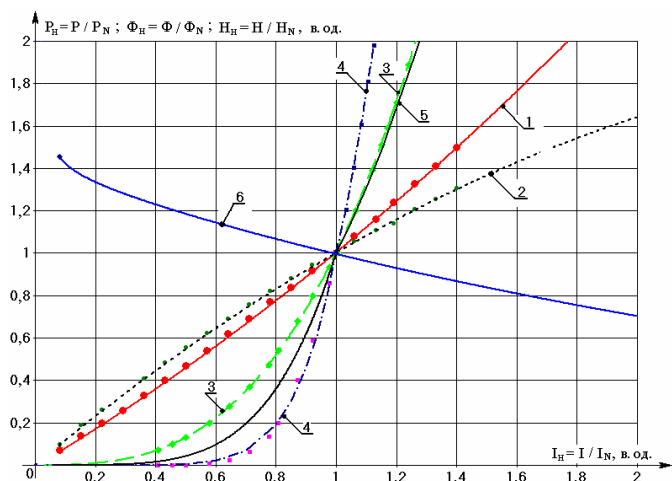


Рисунок 3. Залежності нормованих значень потужності (1,3), світлового потоку (2,4) та світлової віддачі (5,6) теплових та напівпровідникових ДС від нормованих значень струму через них відповідно

Figure 3. Dependence of the normalized values of power (1,3), luminous flux (2,4) and luminous efficacy (5,6) thermal and semiconductor LS from normalized values of current through them accordingly

$$U = R_N \cdot I^\beta, \tag{2}$$

$$U = R_N \cdot I^\beta, \tag{3}$$

де U, I – біжучі значення напруги і струму НДС відповідно, В, А;

$R_N = U_N / I_N^\beta$ – номінальне значення опору НДС, Ом;

$G_N = I_N / U_N^\alpha$ – номінальне значення провідності НДС, См;

U_N, I_N – номінальні значення напруги і струму НДС, зазначені в нормативно технічній документації;

β, α – значення показників степені для струму у виразі (2) і напруги у виразі (3) відповідно, які визначають крутизну ВАХ і АВХ залежно від максимуму довжини хвилі випромінювання (λ_m) НДС. Їх значення, отримані в результаті апроксимації експериментальних даних, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Дані, необхідні для побудови вольт-амперних та ампер-вольтних характеристик за математичними моделями (2) та (3) для кольорових і білих НДС

Колір	$\lambda, \text{нм}$ [6]	Значення-коэф. α	Значення-коэф. β	Напруга на НДС, В	Струм НДС, А	$G_N = I_N / U_N^\alpha$	$R_N = U_N / I_N^\beta$
1	2	3	4	5	6	7	8
Червоний	610-655-700	8,2470	0,121	2,1-2,6 (2,22)	0,35	$(4,872 \cdot 10^{-4})$	2,520
Оранжевий	587-598-610	8,9470	0,112	2,1-2,6 (2,28)	0,35	$(2,196 \cdot 10^{-4})$	2,564
Жовтий	550-568-587	9,1620	0,109	2,1-2,6 (2,36)	0,35	$(1,341 \cdot 10^{-4})$	2,646
Зелений	505-527-550	11,414	0,087	3,2-4,0 (3,25)	0,35	$(5,028 \cdot 10^{-7})$	3,563
Блакитний	485-495-505	10,843	0,092	3,2-4,0 (3,45)	0,35	$(5,158 \cdot 10^{-7})$	3,800
Синій	455-480-485	10,774	0,093	3,2-4,0 (3,50)	0,35	$(4,811 \cdot 10^{-7})$	3,858
Фіолетовий	400-427-455	10,572	0,095	3,2-4,0 (3,60)	0,35	$(4,600 \cdot 10^{-7})$	3,976

* Значення коефіцієнтів α та β для відповідних діапазонів кольорів (стовпчик 2).

Значення G_N (стовпчик 7) та R_N (стовпчик 8) розраховані для напруг, зазначених у стовпчику 5 у дужках.

У зворотному напрямку світлодіоди не вмикають, тому зворотні вітки ВАХ напівпровідникових ДС при проектуванні драйверів до уваги не беруть, хоча й мають на увазі, що пробивні зворотні напруги досить малі й не перевищують 5 В.

Наявність аналітичних виразів (2) і (3) дає можливість отримати вирази для визначення всіх електричних характеристик НДС для будь-яких наперед заданих значень напруг і струмів, а саме:

- потужності, як добуток виразу (2) на струм $P = U \cdot I = (R_N \cdot I^\beta) \cdot I = R_N \cdot I^{(1+\beta)}$ або як добуток виразу (3) на напругу $P = G_N \cdot U^\alpha \cdot U = G_N \cdot U^{(1+\alpha)}$;
- статичного опору, як частку від ділення виразу (2) на струм $R_{cm} = R_N \cdot I^\beta / I = R_N \cdot I^{(\beta-1)}$;
- диференціального опору, як похідну від виразу (2) $R_{оф.} = (R_N \cdot I^\beta)' = R_N \cdot \beta \cdot I^{(\beta-1)}$;
- статичної провідності, як частку від ділення виразу (3) на напругу $G_{cm} = G_N \cdot U^\alpha / U = G_N \cdot U^{(\alpha-1)}$;
- диференціальної провідності, як похідну від виразу (3) $G_{оф.} = (G_N \cdot U^\alpha)' = G_N \cdot \alpha \cdot U^{(\alpha-1)}$.

Регулювати світловий потік НДС так само просто, як і теплових. Межі регулювання, у порівнянні з іншими відомими ДС, у НДС найбільш широкі й знаходяться в діапазоні від 1,6 від номінального значення, при подвійному номінальному струмі, і до нуля (крива 2 на рис. 3).

Найбільші значення світлової віддачі у НДС (крива 6 на рис. 3) спостерігаються при малих значеннях струму. Поступове збільшення струму призводить до її падіння за законом, близьким до лінійного. В той час, як у теплових ДС як світлова віддача, так і світловий потік зі зростанням струму постійно нелінійно зростають. А у люмінесцентних лампах максимальні значення світлової віддачі спостерігаються при номінальних значеннях струму. При перевищенні значень номінального струму відбувається падіння світлової віддачі.

Згадані нормовані залежності електричних і світлотехнічних параметрів НДС та ТДС від нормованих значень струму (рис. 3) добре апроксимуються такими математичними залежностями (при стандартному відхиленні 0,005 і коефіцієнті кореляції $R^2 = 0,99$):

$$P_i = 0,16 \cdot I_i^2 + 0,85 \cdot I_i + 0,05 \text{ – для НДС;} \quad (4)$$

$$\hat{O}_i = -0,18 \cdot I_i^2 + 1,18 \cdot I_i \text{ – для НДС;} \quad (5)$$

$$H_i = \frac{\hat{O}_i}{P_i} = \frac{(-0,18 \cdot I_i^2 + 1,18 \cdot I_i)}{(0,16 \cdot I_i^2 + 0,85 \cdot I_i + 0,05)}, \text{ для } 0,08 \leq I_i \leq 2,0, \text{ – для НДС;} \quad (6)$$

$$P_i = I_i^{2,95}, \text{ для } 0 \leq I_i \leq 1,2 \text{ – для ТДС;} \quad (7)$$

$$\hat{O}_i = I_i^{7,5} \text{ для } 0 \leq I_i \leq 1; \quad \hat{O}_i = I_i^{5,8} \text{ для } 0 \leq I_i \leq 1 \text{ – для ТДС;} \quad (8)$$

$$H_i = I_i^{7,5} / I_i^{2,95} \text{ для } 0 \leq I_i \leq 1; \quad H_i = I_i^{5,8} / I_i^{2,95} \text{ для } 1 \leq I_i \leq 1,2 \text{ – для ТДС.} \quad (9)$$

Як бачимо з виразів (2 – 9), у кожен з них входить нормоване значення номінального струму, що надає їм універсальності з точки зору застосування їх для визначення необхідних характеристик драйверів і розрахунку режимів кінцевих пристроїв комутації, навантажених світловипромінюючими діодами. При цьому значення номінального струму є визначальним. Тому для визначення оптимального значення номінального струму, розроблених на основі світлодіодів світлотехнічних виробів (ретрофітних ламп, світильників різного виду тощо), з точки зору забезпечення необхідної величини СТС, нами були проведені дослідження динаміки перехідних процесів зростання температури на кристалах світлодіодів і спаду світлового потоку виробу від моменту вмикання до переходу в усталений режим. Для досліджень були відібрані ретрофітні НДС шести різних виробників різної потужності, а саме: НДС 1 – Philips Master LED Bulb MV 8 W; НДС 2 – SW-101-7 W 190-240 V 7 W; НДС 3 – TLF

BL 133 10 W (Telefunken); НДС 4 – Verbatium model # 52019 9 W; НДС 5 – ТЛЦ 03-01-10-003 УХЛ 4 10 Вт; НДС 6 – МЕЙ-Е27-10 Вт.

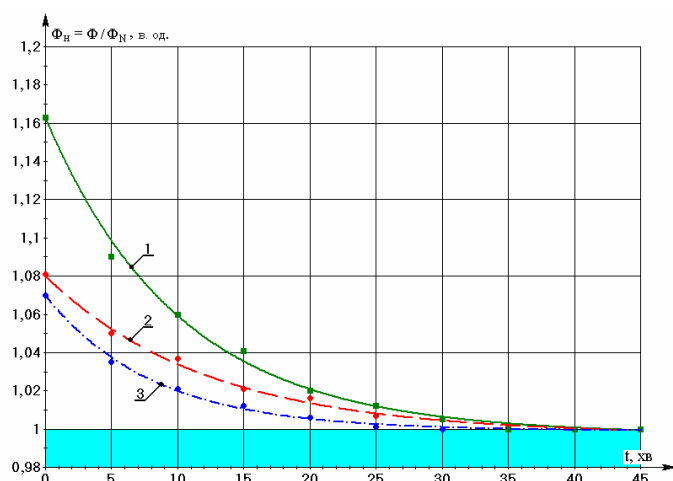


Рисунок 4. Динаміка перехідного процесу спаду світлового потоку НДС від моменту ввімкнення до переходу в ustalений режим: 1 – для НДС 4,5,6; 2 – для НДС 1,2,3; 3 – для НДС 3

Figure 4. Dynamics of the transition process decrease of luminous flux SLS from the moment of switching to the transition into steady state regimes: 1 – to the SLS 4,5,6; 2 – to the SLS 1,2,3; 3 – to the SLS 3

Для забезпечення відтворюваності результатів дослідів кількість НДС кожного типу згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена була прийнята рівною шести [7]. Дослідження проводилися у фотометричній кулі «СПЕКТРОН Coating Integracion Sphere». Температура на кристалі вимірювалася за допомогою термопар. Результати вимірювань по кожному із НДС усереднювалися. Отримані дані були згруповані у дві групи по 3 НДС в кожній (табл. 3 та 4) з близькими за значенням температурами перегрівання корпусу і початковими нормованими світловими потоками. Дані по цих двох групах також усереднювалися. За отриманими таким чином результатами були побудовані відповідні залежності (рис. 4).

Таблиця 3

Результати експериментальних вимірювань і обчислень

t, хв.	Verbatium model # 52019 9 W (8,4)*		ТЛЦ 03-01-10-003 УХЛ 4 10 Вт (9,5)*		МЕЙ-Е27-10 Вт (9,4)*		$\frac{\hat{\phi}_{4i} + \hat{\phi}_{5i} + \hat{\phi}_{6i}}{3}$, в.од	Середнє значення температури на корпусі 67,8°C
	Φ_4 , лм	$\Phi_{4н}$, в.од	Φ_5 , лм	$\Phi_{5н}$, в.од	Φ_6 , лм	$\Phi_{6н}$, в.од		
0	479	1,140	254	1,210	910	1,070	1,163	Середнє значення температури на корпусі 67,8°C
5	456	1,086	236	1,124	880	1,035	1,090	
10	445	1,060	223	1,062	848	1,021	1,060	
15	430	1,024	220	1,048	840	1,012	1,041	
20	423	1,007	216	1,029	830	1,006	1,020	
25	422	1,002	213	1,014	815	1,003	1,012	
30	421	1,001	211	1,005	808	1,002	1,005	
35	420:	1,000:	210:	1,000:	802	1,001	1,000:	
40	420	1,000	210	1,000	800:	1,000:	1,000	
45	420	1,000	210	1,000	800	1,000	1,000	

* у дужках наведено значення реально виміряних потужностей;

: жирним виділено номінальні значення світлових потоків досліджуваних ретрофітних НДС.

Таблиця 4

Результати експериментальних вимірювань і обчислень

t, хв.	Philips Master LED Bulb MV 8 W (7,35)*		SW-101-7 W 190-240 V 7 W (6,6)*		TLF BL 133 10 W (Telefunken) ((9,9)*)		$\frac{\hat{O}_{1r} + \hat{O}_{2r} + \hat{O}_{3r}}{3}$, в.од	
	Φ_1 , лм	Φ_{1n} , в.од	Φ_2 , лм	Φ_{2n} , в.од	Φ_3 , лм	Φ_{3n} , в.од		
0	472	1,073	550	1,100	920	1,070	1,081	Середнє значення температури на корпусі 64,8°C
5	461	1,048	533	1,066	890	1,035	1,050	
10	457	1,036	529	1,056	878	1,021	1,037	
15	453	1,024	520	1,034	870	1,012	1,021	
20	449	1,020	511	1,022	865	1,006	1,016	
25	446	1,014	508	1,016	861	1,001	1,007	
30	443	1,007	504	1,008	860	1,000	1,005	
35	441	1,002	502	1,004	860	1,000	1,002	
40	440	1,000	500	1,000	860	1,000	1,000	
45	440	1,000	500	1,000	860	1,000	1,000	

* у дужках наведено значення реально виміряних потужностей;

: жирним виділено номінальні значення світлових потоків досліджуваних ретрофітних НДС.

Аналіз даних табл. 3 та 4 показав, що при падінні світлового потоку під час перехідного процесу від моменту вмикання до переходу в усталений режим у понад 10%, температура *p-n* переходу НДС перевищує допустимі значення, що прискорює процес деградації параметрів виробу, в тому числі й середньої тривалості світіння. Спад світлового потоку понад 10% разом з температурою корпусу близько 65°C і більше дає підставу критично відноситися до заявленого виробником СТС світлотехнічного виробу.

В процесі аналізу графічних залежностей (рис. 4) з'ясувалося, що динаміка перехідного процесу спаду нормованого світлового потоку НДС (\hat{O}_i) від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим ($\hat{O}_i = 1$) добре описується різницею падаючої (перший доданок у виразі (10)) і зростаючої (другий доданок у виразі (10)) вільних складових – експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування

$$\hat{O}_i = 1 + a \cdot \exp(-t/\tau_1) - b \cdot [1 - \exp(-t/\tau_2)], \quad (10)$$

де *a* – коефіцієнт, який визначає величину початкового нормованого значення світлового потоку НДС при кімнатній температурі *p-n* переходу в момент ввімкнення в мережу (стала інтегрування першого перехідного процесу);

b – коефіцієнт, який визначає величину прискорення динаміки перехідного процесу спаду світлового потоку НДС від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим (стала інтегрування другого перехідного процесу);

τ_1, τ_2 – сталі часу першого та другого перехідних процесів спаду світлового потоку НДС від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим;

t – біжучий час, хв.

З формули (10) можна зробити висновок про те, що за динаміку процесу охолодження *p-n* переходу відповідає два однакових за призначенням процеси. Перший залежить від теплового опору між основою (алюмінієвою або мідною) світловоду і радіатором, а другий – від теплового опору між радіатором і оточуючим середовищем. Величину першого опору можна зменшити за рахунок розташування між основою світлодіодів і поверхнею радіатора різного роду теплопровідних паст, а другого – за

рахунок підвищення ефективності радіаторів: на основі застосування теплових труб, обдування вентилятором, вибору оптимальнішої конфігурації тощо [8, 9].

З викладеного випливає, що для визначення оптимального значення номінального струму, розроблюваних на основі світлодіодів світлотехнічних виробів (ретрофітних ламп, світильників різного роду тощо), з точки зору забезпечення необхідної величини СТС, необхідно зняти динаміку перехідного процесу спаду світлового потоку як мінімум для п'яти рівномірно віддалених один від одного значень струму із рекомендованого в нормативно-технічній документації діапазону. За отриманими даними побудувати залежність відносного спаду світлового потоку від струму. З отриманої залежності вибрати таке значення струму, при якому спад світлового потоку не перевищує 10 %. Саме цей струм і вибрати в якості номінального.

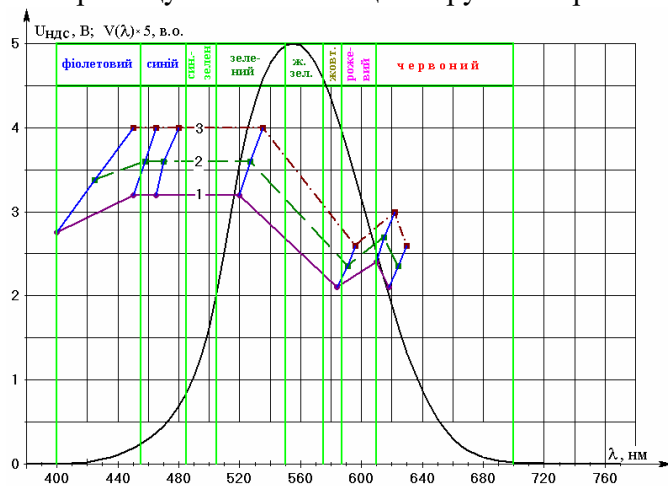


Рисунок 5. Взаємозв'язок між прямим падінням напруги і довжиною хвилі максимуму випромінювання (1 – мінімальною, 2 – типовою і 3 – максимальною) НДС на прикладі світлодіодів фірми GREE (круглих, овальних, SMD та серії P4) [4,11]

Figure 5. The relationship between direct decrease of voltage and the wavelength of maximum emission (1 – minimal, 2 – typical and 3 – maximal) SLS on the example of light emitting diodes of CREE company (round, oval SMD and series P4) [4,11]

Аналіз взаємозв'язку між прямим спаданням напруги і довжиною хвилі максимуму випромінювання НДС (табл. 2, рис. 5) показав, що сучасні технології не дозволяють виготовляти світлодіоди з однозначно стабільними параметрами навіть в одній партії. Відхилення від типових значень прямого спадання напруги на світлодіодах, довжини хвилі максимуму випромінювання, сили світла для певних кутів випромінювання (табл. 1) досить значні. Тому підприємства вимушені займатися розбіркою світлодіодів за напругою, кольірною температурою, світловим потоком, яскравістю, силою світла та індексом кольоропередавання, що призводить до подорожчання кінцевої продукції [10].

Висновки. На основі аналізу та узагальнення отриманих експериментальних даних побудовано алгебраїчну математичну модель електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла у вигляді п'яти взаємозалежних рівнянь [(2), (3), (4), (5), (6)], що відкрило можливість щодо визначення їхньої енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку. Встановлено, що світловипромінюючі діоди є єдиним з існуючих джерел світла, в яких у процесі розгорання відбувається падіння як світлового потоку, так і світлової віддачі, а при дімуванні – зростання світлової віддачі. Уперше доведено, що динаміка перехідного процесу спаду світлового потоку напівпровідникових джерел світла від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим з достатньою для практики точністю описується різницею падаючої і зростаючої експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування, що дає можливість оцінювати вклад кожного з теплових опорів (основа світлодіода-радіатор, радіатор-оточуюче середовище) в процес тепловідведення надлишкового тепла в оточуюче середовище від драйвера та світлодіодів. Доведено, що спад світлового потоку під час перехідного процесу від моменту вмикання до переходу в усталений режим у межах до 10% вказує на те, що при такому тепловому режимі світлотехнічного виробу середня тривалість світіння світлодіодів буде близькою до

заявленого у нормативно-технічній документації номінального значення. Перевищення 10%-ного значення спаду світлового потоку свідчить про наднормативний перегрів $p-n$ переходу світлодіодів, при якому як світлова віддача, так і середня тривалість світіння будуть нижче заявлених. Запропоновано методику визначення оптимального значення номінального струму розроблюваних на основі світлодіодів світлотехнічних виробів з точки зору забезпечення необхідної величини середньої тривалості світіння на основі дослідження залежності відносного спаду їхнього світлового потоку від струму з моменту ввімкнення до переходу в усталений режим, що унеможливить розроблення й виготовлення неякісної продукції.

Conclusions. Based on the analysis and generalization of the obtained and published experimental data there has been constructed algebraic mathematical model of semiconductor light sources' electrical and lighting parameters in the form of five interrelated equations [(2), (3), (4), (5), (6)]. This allows to evaluate their efficiency in the process of regulating the luminous flux. It has been established that light emitting diodes are the only existing light sources in which during the transition process of glow there takes place a decrease in both the luminous flux and luminous efficacy, while under that of dimming – an increase of the light output. For the first time it has been proved that the dynamics of the transition process of semiconductor light sources' luminous flux decrease from the moment of switching to the moment of transition into a steady state regime (with accuracy sufficient for practical purposes) is described by the difference of decreasing and increasing exponential functions of constants of time and integration of various magnitude, which makes it possible to evaluate the contribution of each transient thermal resistance (the base of light emitting diode-radiator, radiator-environment) to the process of the excessive heat transfer from a driver and LEDs to the environment. It has been proved that the decrease of the luminous flux during the transition process from the moment of switching to the transition into the steady state regime within 10% range indicates the fact that under this condition of thermal regime of a lighting product the average duration of the light emitting diode glow will be close to the nominal value claimed in the specifications and technical documentation. The 10% value excess of the luminous flux decrease indicates the light emitting diodes' $p-n$ junction overheating above the allowable level at which both the luminous efficiency and average duration of glow will be lower than stated. There has been developed the method of determining an optimal value of nominal current generated on the basis of LED lighting products in terms of providing the necessary magnitude of an average duration of their glow.

Список використаної літератури

1. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые и микрорелектронные приборы» [Текст] / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – М.: Высш. шк., 1987. – 479 с.
2. Семенов, Ю.Б. Экономичное освещение для всех [Текст] / Ю.Б. Семенов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 224 с.
3. Шуберт, Ф. Светодиоды [Текст]; пер. с англ. под. ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, – 496 с.
4. <http://www.vdmais.kiev.ua>, каталог науково-виробничої фірми VD MAIS.
5. Причины пульсаций светового потока люминесцентных ламп. Тези доповідей XVI наук. конф. (Тернопіль, 5 – 6 грудня 2012 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський національний техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2012. – 143 с.
6. M. Shen, Z. Qian, F.Z. Peng. Design of a Two-Stage Low-Frequency Square-Wave Electronic Ballast for HID Lamps // IEEE Transactions on Industry Application, Vol.39, No.2, 2003, P. 424 – 430.
7. Пальчевський, Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): навч. посібник [Текст] / Б.О. Пальчевський. – Львів: Світ, 2001. – 232 с.
8. Мариничев, Д.В. Об особенностях конструкции и параметрах системы охлаждения мощного осветительного прибора со светодиодами [Текст] / Д.В. Мариничев, Л.В. Низовский, В.Н. Орловский // Светотехника. – 2013. – №3. – С. 29 – 32.

9. Шевырева, А. Решение Sunon для охлаждения мощных светодиодов [Текст] / А. Шевырева // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №3. – С. 32 – 33.
10. Griffiths T. LED Lighting Getting Away From Binning / T. Griffiths // www.sslighting/dokuments/articles/news/120304.html
11. Гуревич, М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) [Текст] / М.М. Гуревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.

Отримано 10.09.2013