

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З СВІТЛОДІОДАМИ

В.А. Андрійчук*, докт. техн. наук, Л.М. Костик**, канд. техн. наук, Я.О. Філюк***, канд. техн. наук, М.С. Наконечний****, канд. техн. наук

Тернопільський Національний технічний університет імені І. Пулюя,

вул. Микулинецька, 46, Тернопіль, 46005, Україна.

Е-mail: AndriyChukva31410@gmail.com;

kostykm1968@gmail.com; filuk.slavik.91@gmail.com, nakmiron1984@gmail.com.

В роботі представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень перехідних процесів в електричних колах з окремо взятим світлодіодом та їх послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням. Показано, що динаміка наростання струму в колі із світлодіодом дуже мало змінюється при переході від окремо взятого СД до паралельного та послідовного їхнього з'єднання. Крім того, час наростання струму значно більший, ніж час його спадання. Порівнюючи динаміку спадання струму в колі і напруги, прикладеної до світлодіода, видно, що вони співпадають. Запропонована еквівалентна схема світлодіода, що представлена паралельною ланкою конденсатора C_d та опору R_d , з'єднаною з послідовним опором R_s , добре узгоджується з теоретичними розрахунками перехідних процесів та з отриманими експериментальними результатами. Основну роль у величині постійної часу τ перехідного процесу відіграє ємність конденсатора C_d , яка визначається дифузною ємністю гетеропереходу. На основі отриманих результатів визначено, що максимальна частота імпульсного живлення світлодіодних світлових приладів $8 \cdot 10^5$ Гц. Бібл. 11, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: світлодіод, гетероперехід, перехідний процес, час наростання, еквівалентна схема.

Вступ. Серед штучних джерел світла найбільшого поширення набувають світлодіодні джерела (СД) завдяки їхній високій світловій віддачі – понад 120 лм/Вт, що значно перевищує цей показник для традиційних джерел загального освітлення. Причому споживачам немає потреби повністю перебудовувати освітлювальну систему. Світлодіоди легко збираються в матрицю потрібної форми і вбудовуються в стандартні корпуси, аналогічно лампам розжарювання, галогенним та люмінесцентним. Задля підвищення електричної та світлової потужності освітлювальних систем використовують модулі з паралельно та послідовно з'єднаними SMD або COB світлодіодними стрічками. Такі світлодіодні лампи оснащені драйверами постійного струму або імпульсними драйверами з широтною модуляцією імпульсів (ШІМ). ШІМ-драйвери добре узгоджуються з уже існуючою системою керування освітленням, тому вони знаходять широке використання. В зв'язку з цим залишається актуальним розробка енергоефективних, довговічних імпульсних джерел живлення для потужних світлотехнічних систем. Один із шляхів їхнього удосконалення базується на дослідженнях динаміки наростання та спадання імпульсів сили струму в електричному колі з СД. На даний час є недостатньо інформації про перехідні процеси в електричних колах з такими модулями. Завданням, яке ставилося перед авторами даної роботи, було проведення теоретичних та експериментальних досліджень перехідних процесів в електричних колах з окремо взятим СД та з паралельними і послідовними їхніми з'єднаннями, а також визначення частотного діапазону ШІМ-драйверів без зайвих втрат енергії.

Теоретичні дослідження. Для теоретичних досліджень перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами будемо користуватися його еквівалентною електричною схемою. На сьогоднішній день для дослідження поведінки світлодіода як нелінійного елемента в електричному колі використовують еквівалентні схеми, що базуються на рівнянні вольт-амперної характеристики Шоткі для p - n переходу. Вони реалізовані двома способами:

– на основі числового розв'язку системи фундаментальних рівнянь розподілу електричного поля $E(x)$ і потенціалу $\phi(x)$ для одновимірного випадку в дифузійно-дрейфовому наближенні за допомогою програми моделювання Sentaurus отримання параметрів для базових елементів еквівалентної схеми [1, 2];

– на основі експериментально отриманих вольт-амперних, вольт-фарадних та температурних характеристик. Така модель містить коефіцієнти, які не пов'язані з реальною структурою гетеропереходу напівпровідникового приладу [3, 4].

Задля розрахунку параметрів електричного кола з СД використана еквівалентна схема, яка базується на теоретичних розрахунках гомогенних та експериментальних дослідженнях гетерогенних p - n переходів і знайшла підтримку в роботах [5-9]. Еквівалентну схему електричного кола із світлодіодом зображено на рис. 1. Тут СД представлений паралельною ланкою, що складається з опору R_d , який визначається опором активної області гетеропереходу, та конденсатора C_d , ємність якого дорівнює дифузній ємності p - n переходу. Послідовно їм приєднаний опір R_s , що включає опір пасивних областей СД, а також опір провідникових елементів електричного кола живлення. Додатково на даній схемі також зображено R_0 – внутрішній опір джерела та K – ключ, який під'єднує його до СД. Така схема заміщення добре узгоджується з експериментальними даними за слабого збудження p - n переходу [5]. У випадку сильного збудження ємність C_d та опір R_d , вже не можна вважати постійними [6].

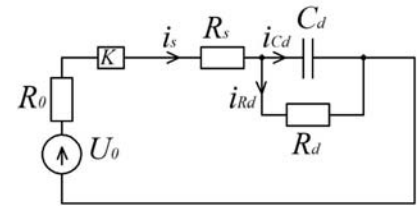


Рис. 1

Для опису перехідного процесу в електричному колі із світлодіодом використаємо операторний метод. Еквівалентна електрична схема світлодіода залишається без змін, лише опір конденсатора буде дорівнювати $1/pC_d$, а ЕРС джерела – U_0/p , де p – комплексний оператор.

Запишемо в операторній формі опір електричного кола еквівалентного СД

$$Z(p) = R_s + R_0 + \frac{R_d}{R_d C_d p + 1}. \quad (1)$$

Рівняння операторного струму у цьому колі

$$i_s(p) = \frac{U_0 (R_d C_d p + 1)}{p((R_s + R_0) R_d C_d p + R_s + R_0 + R_d)}. \quad (2)$$

Здійснимо перехід від операторного струму $i_s(p)$ до оригіналу $i_s(t)$, використовуючи теорему розкладання. В кінцевому варіанті отримуємо рівняння, яке описує зміну струму в електричному колі із світлодіодом у разі подачі імпульсу постійної напруги

$$i(t) = \frac{U_0}{R_s + R_0 + R_d} \left(1 + \frac{R_d}{R_s + R_0} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right), \quad (3)$$

$$\tau_1 = \frac{(R_s + R_0) R_d C_d}{R_s + R_0 + R_d} = \frac{R_d C_d}{1 + \frac{R_d}{R_s + R_0}}, \quad (4)$$

де τ_1 – постійна часу за експоненціального закону наростання струму в колі.

Поряд із постійною часу τ_1 часто використовують час наростання і спадання струму або напруги τ_r , який визначається інтервалом часу між моментами, що становлять 10% і 90% від усталеного значення. За експоненціального закону динаміки сигналу $\tau_r \approx 2,2 \tau_1$ [8].

Тепер розглянемо випадок, коли маємо n однакових СД, які з'єднанні послідовно, як це показано на схемі операторного кола, представленого еквівалентною схемою з послідовно з'єднаними світлодіодами рис. 2, а.

Запишемо в операторній формі опір електричного кола, зображеного на даному рисунку. Використаємо раніше визначений опір окремої ланки (1). Загальний опір у разі послідовного їхнього з'єднання буде дорівнювати

$$Z(p) = R_0 + n \left(R_s + \frac{R_d}{R_d C_d p + 1} \right) = \frac{R_0 (R_d C_d p + 1) + n (R_s + R_d + R_s R_d C_d p)}{R_d C_d p + 1}. \quad (5)$$

Операторний струм в даному колі

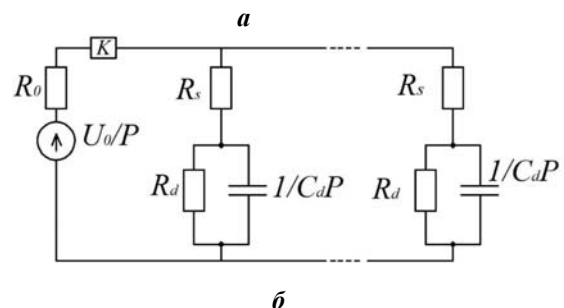
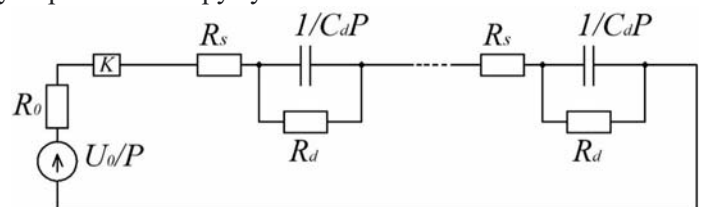


Рис. 2

$$i(p) = \frac{U_0(R_d C_d p + 1)}{p(R_0(R_d C_d p + 1) + n(R_s R_d C_d p + R_s + R_d))} \quad (6)$$

Рівняння, яке описує зміну струму в електричному колі з n послідовно з'єднаними світлодіодами у разі подачі імпульсу постійної напруги

$$i(t) = \frac{U_0}{R_0 + n(R_s + R_d)} \left(1 + \frac{nR_d}{R_0 + nR_s} e^{-\frac{t}{\tau'}} \right), \quad (7)$$

де

$$\tau' = \frac{(R_0 + nR_s)R_d C_d}{R_0 + n(R_s + R_d)} = \frac{R_d C_d}{1 + \frac{nR_d}{nR_s + R_0}}. \quad (8)$$

Розглянемо випадок, коли в електричному колі паралельно з'єднано n СД, представлені еквівалентною схемою з паралельно з'єднаними світлодіодами рис. 2, б.

Запишемо в операторній формі провідність електричного кола, використавши провідність еквівалентної схеми світлодіода,

$$G(p) = \frac{R_d C_d p + 1}{R_s R_d C_d p + R_s + R_d}, \quad (9)$$

$$G''(p) = nG(p) = \frac{n(R_d C_d p + 1)}{R_s R_d C_d p + R_s + R_d}. \quad (10)$$

Загальний операторний опір електричного кола (рис. 3) з джерелом живлення U_0/p та внутрішнім опором R_0 буде дорівнювати

$$Z(p) = \frac{1}{G''(p)} + R_0 = \frac{R_s R_d C_d p + R_s + R_d + nR_0(1 + R_d C_d p)}{n(R_d C_d p + 1)}. \quad (11)$$

Операторний струм в даному колі

$$i(p) = \frac{U_0}{p} \cdot \frac{1}{Z(p)} = \frac{U_0}{p} \cdot \frac{n(R_d C_d p + 1)}{R_s R_d C_d p + R_s + R_d + nR_0(1 + R_d C_d p)}. \quad (12)$$

Наростання струму в колі з n паралельно з'єднаними світлодіодами у разі подачі імпульсу напруги

$$i(t) = \frac{nU_0}{R_s + R_d + nR_0} \left(1 + \frac{R_d}{R_s + nR_0} e^{-\frac{t}{\tau''}} \right), \quad (13)$$

де

$$\tau'' = \frac{(R_s + nR_0)R_d C_d}{R_s + R_d + nR_0} = \frac{R_d C_d}{1 + \frac{R_d}{R_s + nR_0}}. \quad (14)$$

Перейдемо до аналізу перехідних процесів, коли вимикається джерело ЕРС, і струм в електричному колі починає спадати. Операторна схема електричного кола із світлодіодом у разі відключення джерела напруги зображена на рис. 3. При розмиканні ключа K перехідний процес зосереджений в електричному контурі 1-2-3 і визначається динамікою струму i_{Cd} , а спадання струму i_1 буде визначатися параметрами ключа K , з'єднувальних елементів та джерела U_0 .

Рівняння електричної рівноваги у виділеному контурі

$$i_{Cd}(p) \left(\frac{1}{C_d p} + R_d \right) = \frac{U_{Cd}(0) R_d}{p(R_0 + R_s + R_d)}, \quad (15)$$

де

$$U_{Cd}(0) = U_{Cd}(-0) = \frac{U_0 \cdot R_d}{p(R_0 + R_s + R_d)}. \quad (16)$$

Корінь характеристичного рівняння $p = -(R_d C_d)^{-1}$ і, відповідно, постійна часу спадання струму в контурі $\tau = R_d C_d$.

Рівняння спадання струму в електричному колі із світлодіодом у разі відключення джерела напруги або по задньому фронту імпульсу струму

$$i_{Cd}(t) = \frac{U_0}{R_0 + R_s + R_d} e^{-\frac{t}{R_d C_d}}. \quad (17)$$

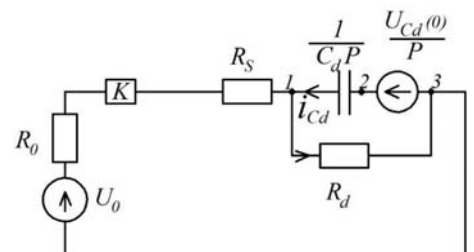


Рис. 3

Аналогічна картина перехідного процесу буде спостерігатися і в електричних колах з послідовним або паралельним з'єднанням світлодіодних джерел світла.

Експериментальні дослідження. Для експериментальних вимірювань взято два типи світлодіодів: FYL-3014 і ARPb L-1W червоного, зеленого, синього та білого свічення електричною потужністю 0,1, 1 та 3 Вт, світлодіодний модуль із збірних однокорпусних СД матриць (10 Вт) та світловий прилад (СП) ДО73У виробництва ВАТ Ватра із змішаним їх з'єднанням. Світлодіоди FYL-3014 потужністю 0,1 живилися від генератора SIGLENT SDG 1050 П-подібними імпульсами, частота яких змінювалася в межах 1-500 кГц і заповнення 30-95%. Для живлення СД FYL-3014 і ARPb L-1W 1 та 3 Вт, а також СП додатково використовували електронний ключ, схема якого приведена в роботі [10]. Зміна струму в колі визначалася по спаду напруги на послідовно включеному опорі R , який разом із внутрішнім опором джерела не перевищував 5 Ом. Результати експериментів записувалися на персональному комп'ютері. Більш детальний опис установки та схема електронного ключа зроблено в [10].

На рис. 4 наведено осцилограми переднього та заднього фронту імпульсу струму: *a* – для одного та трьох паралельно і послідовно з'єднаних СД FYL-3014 білого свічення; *б* – для СП ДО73У із послідовно-паралельним їхнім з'єднанням.

Аналізуючи динаміку наростання та спадання струму в колі з СД, було встановлено, що в переважній більшості випадків вона має дві складові, які описуються експоненціальною залежністю. Задля її характеристики використали інтервали часу між моментами, що становлять 10% і 90% від усталеного значення, і позначили їх $\tau_{\text{нар}}$ та $\tau_{\text{спад}}$. В таблиці приведені їхні числові значення.

Слід відмітити, що час наростання струму в колі із світлодіодами значно більший, ніж час його спадання, і вони мало змінюються за послідовного, паралельного та змішаного з'єднанні.

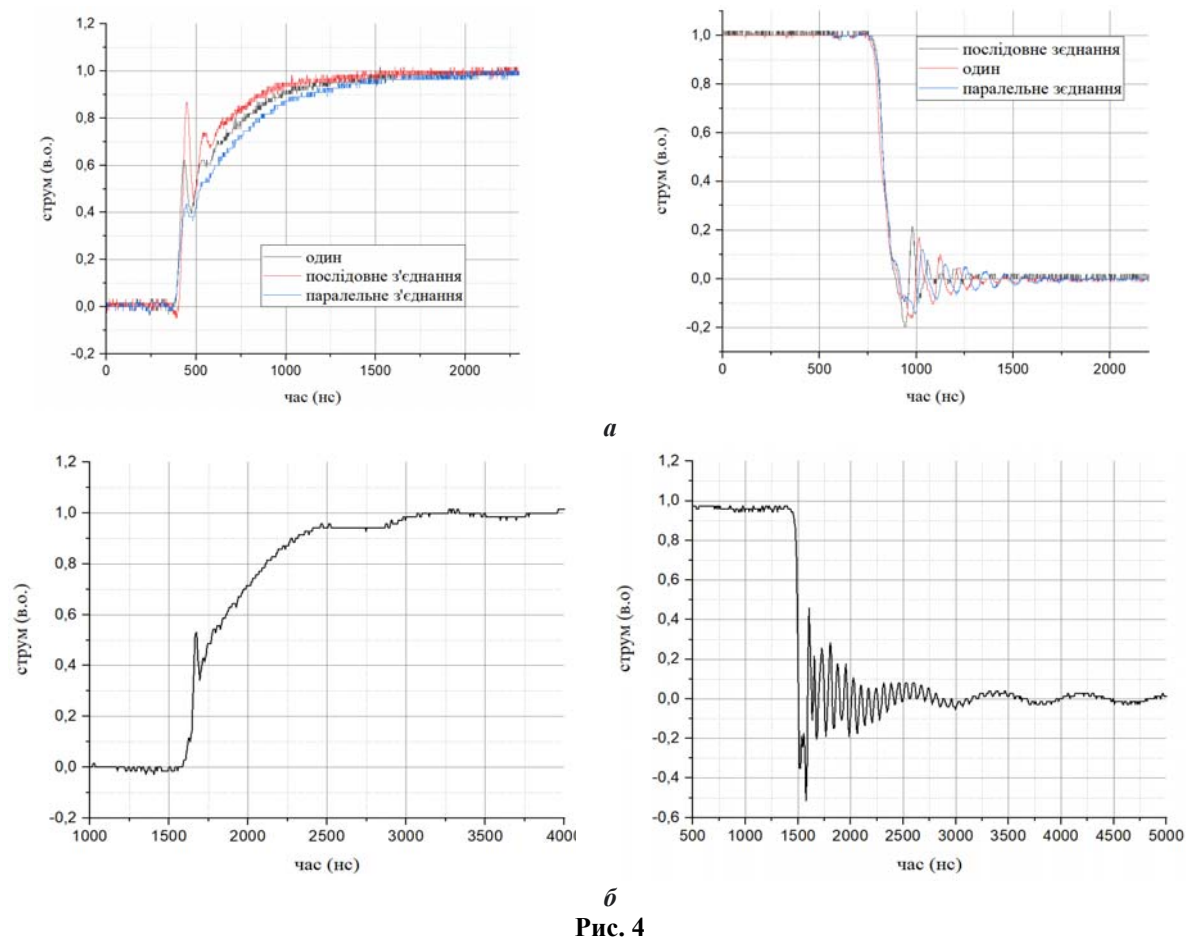


Рис. 4

	наростання	спадання
	$\tau_{rнар}$	$\tau_{rспад}$
Білий		
один	600	27
послідовно	450	
паралельно	750	
Зелений		
один	550	26
послідовно	400	
паралельно	650	
Синій		
один	550	26
послідовно	430	
паралельно	600	
Червоний		
один	530	35
послідовно	520	
паралельно	510	
СП ДО73У	660	55
СД матриця 10 Вт	680	51

Також були проведені вимірювання динаміки світлового потоку як для окремих СД, так і для їхнього послідовного, паралельного та змішаного з'єднань. На рис. 5 показано осцилограми наростання та спадання світлового потоку для СП ДО73У і збірних однокорпусних СД матриць (10 Вт). Постійна наростання світлового потоку для СД матриць і СП ДО73У дорівнює 500 та 630 нс, відповідно. Спадання світлового потоку має дві складових: швидку – 100 нс і повільну – 600 нс. Динаміка світлових імпульсів добре узгоджується з перехідними процесами струму в колі з даними джерелами світла, а їх невелику різницю можна пояснити особливостями рекомбінаційних процесів в активній області гетеропереходу.

Аналізуючи отримані експериментальні результати, можна вважати, що динаміка наростання струму в колі із світлодіодом та їх світлового потоку мало змінюється під час переходу від окремо взятого СД до паралельного та послідовного їхнього з'єднання. Крім того, час наростання імпульсу значно більший, ніж час його спадання. Порівнюючи динаміку спадання струму і напруги, прикладеної до світлодіода, видно, що вони співпадають. Це свідчить про те, що перехідний процес в колі із світлодіодом у разі припинення подачі напруги протікає в замкнутому контурі 1-2-3 (рис. 3). Тобто, задній фронт імпульсу струму повторює задній фронт імпульсу напруги, постійна часу якого значно менша, ніж переднього фронту струму.

Це добре узгоджується із запропонованою еквівалентною схемою світлодіода та результатами розрахунку перехідних процесів в даному колі, що є важливо під час розрахунку електричних кіл з СД. Отримані експериментальні результати показують, що часові характеристики перехідних процесів в електричному колі із світлодіодами, які використовуються у освітлювальних мережах, суттєво відрізняються від характеристик для точкових СД [8, 9].

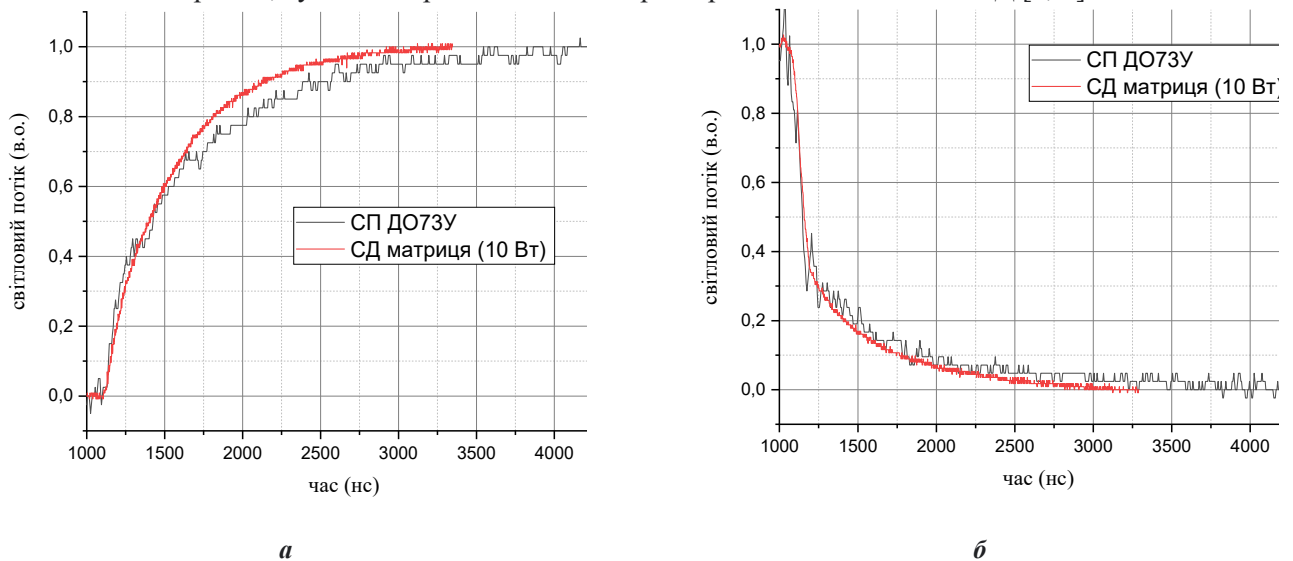


Рис. 5

Це свідчить про те, що основну роль у величині τ відіграє ємність конденсатора C_d , яка визначається дифузною ємністю гетеропереходу. В СД, які використовуються в світлових приладах, площа $p-n$ переходу велика, іноді сягає розміру всього світлодіодного кристалу, наприклад, (250×250) мкм. Крім того, такі СД будуються на гетеропереходах з декількома квантовими ямами, що також буде збільшувати C_d за рахунок накопичення в них заряду. Отже, такі світлодіоди мають ємність, яка може сягати 200-300 нФ і більше [8, 9].

Проаналізуємо вплив опорів R_s , R_d та R_0 на динаміку перехідного процесу. У разі прямого зміщення напруга джерела спадає не тільки на опорі гетеропереходу R_d , але і на опорі базових напівпровідників R_s . При цьому $R_s \ll R_d$ [9]. Це також впливає із ВАХ світлодіодів [8]. Внутрішній опір джерела напруги R_0 складає десятки долі Ома, тому $R_0 \ll R_s$.

Повернемося до постійної часу наростання струму в колі з одним СД (див. формула 4).

Враховуючи, що $(R_s + R_0) \ll R_d$, в знаменнику ним можна знехтувати і, скоротивши R_d , отримаємо

$$\tau_1 = (R_s + R_0)C_d. \quad (18)$$

Аналогічно поступимо з часом наростання струму в колі з послідовним з'єднанням СД (рівняння 8). Оскільки $(R_0 + nR_s) \ll nR_d$, в знаменнику ним можна знехтувати і, скоротивши R_d , отримаємо

$$\tau' = (R_s + \frac{R_0}{n})C_d. \quad (19)$$

Для паралельного з'єднання, якщо врахувати в рівнянні (14), що $R_s + nR_0 \ll R_d$, постійна наростання струму в такому колі

$$\tau'' = (R_s + nR_0)C_d. \quad (20)$$

З рівнянь (18)–(20) видно, що час наростання струму в колі з послідовним з'єднанням менший, ніж в колі з окремо взятим СД, а за паралельного їхнього з'єднання він більший: $\tau' < \tau_1 < \tau''$. Різниця ця є невеликою, тому за імпульсного живлення з широтною модуляцією імпульсів спосіб з'єднання СД не буде впливати на ефективність їхнього частотного живлення.

На основі отриманих результатів визначили максимальну частоту імпульсного живлення світлових приладів на основі даних типів СД

$$f = \frac{1}{\tau_{\text{нар}} + \tau_{\text{спад}}} = \frac{1}{1250} 10^9 = 8 \cdot 10^5 \text{ Гц}. \quad (21)$$

Таким чином, для частотного живлення світлових приладів із СД джерелами світла можна використовувати драйвери з максимальною частотою імпульсів $8 \cdot 10^5$ Гц. Що до мінімальної або вибору оптимальної частоти, то слід мати на увазі, що енергетична ефективність світлових приладів за частоти нижче максимальної не змінюється [10], тому під час вибору частотного діапазону драйверів з широтною модуляцією потрібно враховувати лише вплив пульсації світлового потоку на фоторецептори сітківки очей людини [11].

Висновки.

1. Представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень перехідних процесів в електричних колах з окремо взятим світлодіодом та їхнім послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням.

2. Показано, що постійна часу наростання струму, яка визначається інтервалом між моментами, що становлять 10% і 90% від усталеного значення, змінюється в межах 400 – 680 нс під час переходу від одиничного СД до світлових приладів із змішаним з'єднанням.

3. Постійна часу спадання струму в електричному колі із світлодіодом лежить в межах 25 – 35 нс, що набагато менше від постійної часу наростання.

4. На основі результатів дослідження динаміки перехідних процесів в електричних колах із світлодіодами визначено максимальну частоту драйвера $8 \cdot 10^5$ Гц.

5. Запропонована еквівалентна схема світлодіода та представлені теоретичні розрахунки перехідних процесів в електричному колі з нею добре узгоджуються з отриманими експериментальними результатами.

1. Lee G. W., Kim H., Park J., Shim J.-I., Shin D.-S. Investigation of Luminance Degradation in Organic Light-Emitting Diodes by Impedance Spectroscopy. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2018. Vol. 30. Pp. 1183–1185. DOI: <https://doi.org/10.1109/lpt.2018.2838099>.

2. Ewert T. Advanced TCAD simulations and characterization of semiconductor devices: diss of Dr. Ph. Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala. 2006. 182 p.

3. Górecki K., Ptak P. Compact Modelling of Electrical, Optical and Thermal Properties of Multi-Colour Power LEDs Operating on a Common PCB. *Energies*. 2021. Vol. 14. No 5. P. 1286. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051286>.

4. Poppe A., Farkas G., Gaál L., Hantos G., Hegedüs J., Rencz M. Multi-Domain Modelling of LEDs for Supporting Virtual Prototyping of Luminaires. *Energies*. 2019. Vol. 12. No 10. P. 1909. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12101909>.

5. Shi D., Li J., Liu Y., Shi L., Huang Y., Wang Z., Zhang X., Vladimirescu A. Effect of Illumination Intensity on LED Based Visible Light Communication System. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. Paris, France, 27-29 October 2020. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/BMSB49480.2020.9379384>.

6. Perlaza J.S.B., Torres J.C., Morales M., Martínez-Sarriegui I., Valle C. del I., Sánchez Pena J.M. Characterization of high-power white leds for VLC applications. In: *Measurement: Sensors. Proceedings of XXIII IMEKO World Congress*. Yokohama, Japan, 30 August – 03 September 2021. Vol. 18. ID: 100215. 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100215>.

7. Бондаренко Д.В. Моделювання оптоелектронного навантаження, яке живиться від фотоелемента та акумулятора. *Відновлювана енергетика*. 2020. № 2. С. 28-33.

8. Schubert E.F. Light-Emitting Diodes. E. Fred Schubert, 2018. 672 p.
9. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. К.: Освіта України, 2011. 462 с.
10. Андрійчук В.А., Наконечний М.С., Осадца Я.М., Філюк Я.О. Дослідження світлодіодних джерел світла при імпульсному живленні. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 1. С. 68-72. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>.
11. Бондаревський С.Л., Данилейко О.К., Рожненко Ж.Г. Експериментальне дослідження коефіцієнта пульсації світлового потоку джерел штучного освітлення. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 5/1(31). С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.79727>.

RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES IN AN ELECTRIC CIRCUIT WITH A LED

V.A. Andriychuk, L.M. Kostyk, Y.O. Filiuk, M.S. Nakonechnyi
Ternopil I. Puluj National Technical University,
Mykulynetska Str. 46, Ternopil, 46005, Ukraine.

E-mail: Andriychukva31410@gmail.com; kostykm1968@gmail.com; filuk.slavik.91@gmail.com;
nakmiron1984@gmail.com.

The following documents presents the culmination of theoretical and innovative studies of transient processes in electric technology with a separate LED and their serial, parallel and varied connection. It becomes apparent that the dynamics of current growth in a circuit with an LED has no significant changes when switching from a single LED to their parallel and series connection. Furthermore, the rise time of the current is much longer than the time of its fall. Comparing the dynamics of the current drop in the circuit and the voltage applied to the LED, is shown that they intersect. The suggested equivalent circuit of the LED, represented by the parallel link of the capacitor C_d and resistance R_d connected to the series resistance R_s , is in good concurrent with theoretical calculations of transient processes and with the obtained innovative outcomes. The main task in the value of the time constant τ of the transient process is played by the capacitance of the capacitor C_d , which is ascertained by the diffuse capacitance of the heterojunction. Based upon obtained results, it was established that the maximum pulse power frequency of LED lighting devices is $8 \cdot 10^5$ Hz. References 11, figures 5, table 1.

Keywords: LED, heterojunction, transition process, rise time, equivalent circuit.

1. Lee G. W., Kim H., Park J., Shim J.-I., Shin D.-S. Investigation of Luminance Degradation in Organic Light-Emitting Diodes by Impedance Spectroscopy. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2018. Vol. 30. Pp. 1183–1185. DOI: <https://doi.org/10.1109/lpt.2018.2838099>.
2. Ewert T. Advanced TCAD simulations and characterization of semiconductor devices: diss of Dr. Ph. Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala. 2006. 182 p.
3. Górecki K., Ptak P. Compact Modelling of Electrical, Optical and Thermal Properties of Multi-Colour Power LEDs Operating on a Common PCB. *Energies*. 2021. Vol. 14. No 5. P. 1286. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051286>.
4. Poppe A., Farkas G., Gaál L., Hantos G., Hegedüs J., Rencz M. Multi-Domain Modelling of LEDs for Supporting Virtual Prototyping of Luminaires. *Energies*. 2019. Vol. 12. No 10. P. 1909. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12101909>.
5. Shi D., Li J., Liu Y., Shi L., Huang Y., Wang Z., Zhang X., Vladimirescu A. Effect of Illumination Intensity on LED Based Visible Light Communication System. IEEE International Symposium on *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. Paris, France, 27-29 October 2020. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/BMSB49480.2020.9379384>.
6. Perlaza J.S.B., Torres J.C., Morales M., Martínez-Sarriegui I., Valle C. del I., Sánchez Pena J.M. Characterization of high-power white leds for VLC applications. In: Measurement: Sensors. Proceedings of XXIII IMEKO World Congress. Yokohama, Japan, 30 August – 03 September 2021. Vol. 18. ID: 100215. 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100215>.
7. Bondarenko D.V. Modeling an optoelectronic load powered by a photovoltaic cell and a battery. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2020. No 2. Pp. 28-33. (Ukr)
8. Schubert E.F. Light-Emitting Diodes. E. Fred Schubert, 2018. 672 p.
9. Borysov O.V. Fundamentals of solid-state electronics: teaching manual. Kyiv: Osvita Ukrainy, 2011. 462 p. (Ukr)
10. Андрійчук В.А., Наконечний М.С., Осадца Я.М., Філюк Я.О. Study of LED light sources with pulse power supply. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. Vol. 1. Pp. 68-72. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>. (Ukr)
11. Бондаревський С.Л., Данилейко О.К., Рожненко Ж.Г. Експериментальне дослідження коефіцієнта пульсації світлового потоку джерел штучного освітлення. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. No 5/1 (31). Pp. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.79727> (Ukr)

Надійшла 14.12.2023
Остаточний варіант 22.02.2024