

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З СВІТЛОДІОДАМИ

Андрійчук Володимир Андрійович,

доктор технічних наук, професор

Філюк Ярослав Олександрович,

кандидат технічних наук,

Наконечний Мирослав Степанович,

кандидат технічних наук

Тернопільський Національний Технічний Університет імені І. Пулюя

E-mail: *filuk.slavik.91@gmail.com*

Світлодіодні джерела світла(СД) набули найбільшого поширення завдяки їх високій світловій віддачі, тривалому часу та невибагливим умовам експлуатації. При їх впровадженні не виникає потреб повністю перебудувувати освітлювальну систему, світлодіоди легко вбудовуються в стандартні корпуси, розроблені для традиційних джерел світла. Такі світлодіодні лампи з паралельним, послідовним та змішаним з'єднанням СД оснащуються імпульсними драйверами з широтною модуляцією імпульсів (ШІМ). Для них важливу роль відіграє перехідний процес в електричному колі. На даний час є недостатньо інформації про перехідні процеси в електричних колах з світлодіодними джерелами. Завданням, яке ставилось перед авторами даної роботи, було розробити методику розрахунку та провести аналіз перехідних процесів в електричному колі з СД.

Для теоретичного аналізу перехідних процесів в електричному колі з СД використали його еквівалентну електричну схему, яка базується на теоретичних розрахунках гомогенних та експериментальних дослідженнях гетерогенних $p-n$ переходів і знайшла підтримку в роботах [1-4]. Вона приведена на рис. 1.

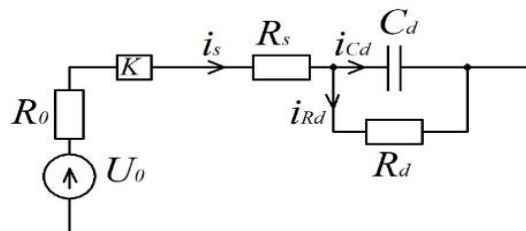


Рисунок 1 – Еквівалентна електрична схема електричного кола з СД

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 замикає або розмикає коло.

Для розрахунку перехідного процесу використали операторний метод та еквівалентну електричну схему світлодіода. При цьому електрична схема, приведена на рис.1, залишається без змін, лише опір конденсатора буде дорівнювати $1/pC_d$, а ЕРС джерела U_0/p , де p – комплексний оператор.

При замиканні ключа зміна операторного струму $i_s(p)$ і струму оригіналу $i_s(t)$ в даному колі описуються рівняннями:

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

$$i_s(t) = \frac{U_0}{R_s + R_0 + R_d} \left(1 + \frac{R_d}{R_s + R_0} e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right), \text{ де } \tau_1 = \frac{(R_s + R_0)R_d C_d}{R_s + R_0 + R_d} = \frac{R_d C_d}{1 + \frac{R_d}{R_s + R_0}}.$$

Тепер розглянемо випадок коли маємо n однакових СД, які з'єднанні послідовно. В кінцевому варіанті рівняння, яке описує зміну струму в електричному колі з n послідовно з'єднаними світлодіодами при подачі імпульсу постійної напруги:

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

У випадку коли в електричному колі паралельно з'єднано n СД, використовували провідність еквівалентної схеми світлодіода:

$$G(p) = \frac{R_d C_d p + 1}{R_s R_d C_d p + R_s + R_d}.$$

Наростання струму в колі з n паралельно з'єднаними світлодіодами при подачі імпульсу напруги описується рівнянням:

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

Перейдемо до аналізу перехідних процесів, коли вимикається джерело ЕРС і струм в електричному колі починає спадати. Операторна схема електричного кола з світлодіодом при відключенні джерела напруги зображена на рис. 2.

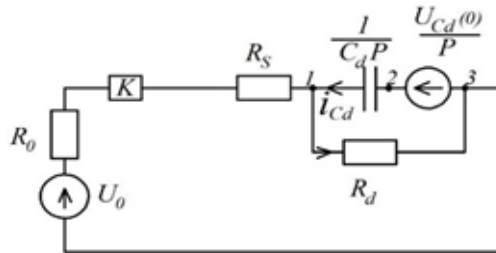


Рисунок 2 – Операторна схема електричного кола з СД при відключенні джерела напруги

При розмиканні ключа K перехідний процес буде зосереджений в електричному контурі (123) і буде визначатися динамікою струму i_{cd} , а спадання струму i_1 буде визначатися параметрами ключа K , з'єднувальних елементів та внутрішнім опором джерела U_0 .

Рівняння електричної рівноваги у виділеному контурі:

$$i_{cd}(p) \left(\frac{1}{C_d p} + R_d\right) = \frac{U_{cd}(0)R_d}{p(R_0 + R_s + R_d)}, \text{ де } U_{cd}(0) = U_{cd}(-0) = \frac{U_0 \cdot R_d}{p(R_0 + R_s + R_d)}.$$

Корінь характеристичного рівняння $p = -\frac{1}{R_d C_d}$ і, відповідно, постійна часу спадання

струму в контурі $\tau_2 = R_d C_d$.

Спадання струму в електричному колі з світлодіодом, при відключенні джерела напруги, описується рівнянням:

$$i_{cd}(t) = \frac{U_0}{R_0 + R_s + R_d} e^{-\frac{t}{\tau_2}}.$$

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

Для експериментальних вимірювань було 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 живились 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 [3].

На рис. 3 подані осцилограми переднього та заднього фронту імпульсу струму для одного та трьох паралельно і послідовно з'єднаних СД FYL-3014 білого свічення. Аналізуючи динаміку наростання та спадання струму в колі з СД було встановлено, що в переважній більшості випадків вона має дві складові, швидку і повільну. Для її характеристики використали інтервал часу між моментами, що становлять 10% і 90% від усталеного значення.

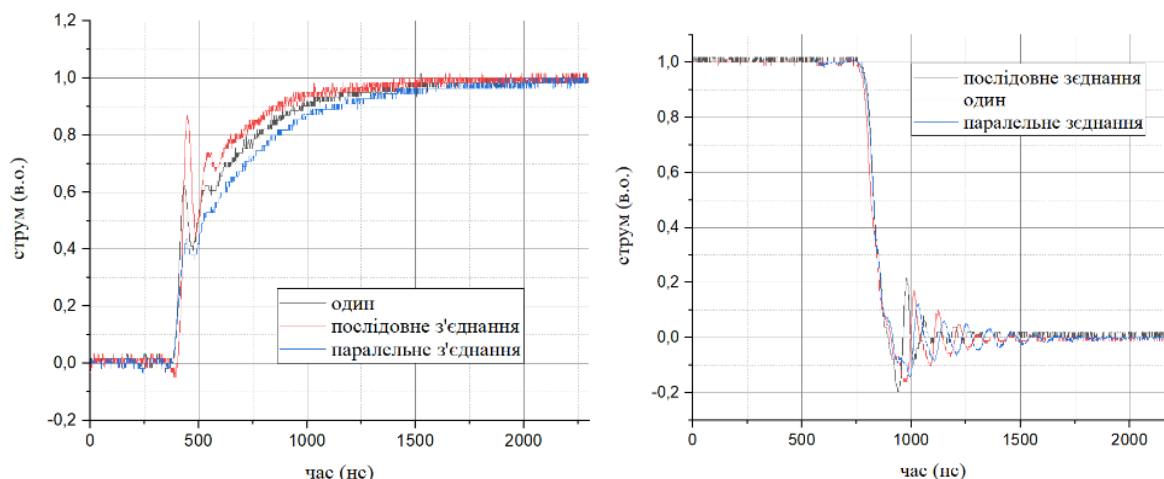


Рисунок 3 – Осцилограми переднього та заднього фронту імпульсу струму

Також були проведені вимірювання динаміки світлового потоку як для окремих СД, так і для їх послідовного, паралельного та змішаного з'єднання. Постійна наростання світлового потоку для окремих СД та їх послідовного і паралельного з'єднання лежить в межах 500–600 нс. Спадання світлового потоку має дві складових: швидку – 100–120 нс і повільну – 500–600 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. Таким чином, для частотного живлення світлових приладів із СД джерелами світла, можна використовувати драйвери з максимальною частотою імпульсів $8 \cdot 10^5$ Гц.

Список використаних джерел

1. Shi, D., Li, J., Liu, Y., Shi, L., Huang, Y., Wang, Z., Vladimirescu, A. Effect of Illumination Intensity on LED Based Visible Light Communication System. In *2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. Pp. 1-4.
2. Perlaza, J. S. B.; Torres, J. C.; Morales, M.; Martínez-Sarriegui, I.; Valle, C. del I.; Sánchez Pena, J. M. (2021). Characterization of high-power white leds for VLC applications. In: *Measurement: Sensors. Proceedings of XXIII IMEKO World Congress, Yokohama, Japan. 2021. Vol. 18.*
3. Андрійчук В., Наконечний М., Осадца Я., Філюк Я. (2021). Дослідження світлодіодних джерел світла у випадку імпульсного живлення. *Технічна електродинаміка*, (1), 068. <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>
4. Андрійчук В., Костик Л., Філюк Я., Наконечний М. (2024). Дослідження перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами. *Технічна електродинаміка*, (2), 087. <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.087>