https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-3
УДК 621.327

АНДРІЙЧУК ВОЛОДИМИР
Тернопільський Національний Технічний Університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0001-7124-2777
e-mail: Andriychukva31410@gmail.com
НАКОНЕЧНИЙ МИРОСЛАВ
Тернопільський Національний Технічний Університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0001-5434-7729
e-mail: nakmiron1984@gmail.com
ФІЛЮК ЯРОСЛАВ
Тернопільський Національний Технічний Університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0003-1869-4402
e-mail: filuk.slavik.91@gmail.com
КОСТИК ЛЮБОВ
Тернопільський Національний Технічний Університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0003-3702-8210
e-mail: kostykm1968@gmail.com
ОСАДЦА ЯРОСЛАВ
Тернопільський Національний Технічний Університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0002-0831-8561
e-mail: osadtca@tntu.edu.ua

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНОГО ЖИВЛЕННЯ ТА ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Напівпровідникові джерела світла охоплюють різні сфери застосування від зовнішнього і побутового освітлення до дисплеїв комп'ютерних систем та портативної електроніки, від світлових приладів автомобілів до опромінювальних систем в аграрному секторі. У всіх цих середовищах їх виділяє висока енергетична ефективність, спрощена система живлення та керування. Щоб уникнути коливань світлового потоку при постійному струмі живлення і великій крутизні ВАХ прямого зміщення діода, виникає необхідність стабілізації струму, що приводить до додаткових енергетичних затрат та ускладнень системи керування світловим потоком. Перевагу отримують імпульсні системи живлення з широтною модуляцією імпульсів (ШІМ). В даній статті проведено аналіз параметрів системи ШІМ-живлення однополярними імпульсами прямокутної форми та залежності світлового потоку при їх зміні. Встановлено, що при струмах інжекції 0,43 – 1,45 мА світловий потік лінійно зростає з коефіцієнтом k=0,179, що пояснюється мономолекулярним механізмом рекомбінації. При подальшому збільшенні струму інжекції, спостерігається нелінійне зростання світлового потоку, що описується поліномом третього порядку.

Ключові слова: імпульсні системи живлення, широтно-імпульсна модуляція, світловий потік, струм інжекції.

ANDRIICHUK VOLODIMIR, NAKONECHYI MYROSLAV, FILIUK YAROSLAV, KOSTYK LIUBOV, OSADTSA YAROSLAV
Ternopil I. Pulyuy National Technical University, ul. Mikulinetska 46, Ternopil, Ukraine

ANALYSIS OF PULSE POWER SUPPLY PARAMETERS AND RADIATION FLUX OF LED LIGHT SOURCES

Semiconductor light sources are widely used across various applications, including outdoor and household lighting, displays for computer systems and portable electronics, automotive lighting, and even irrigation systems in the agricultural sector. Their popularity is largely due to their high energy efficiency, long lifespan, and the simplicity of their power supply and control systems. However, maintaining a stable luminous flux is crucial, as fluctuations can occur due to variations in the supply current and the steep voltage response of the forward-biased diode. To achieve stability, current regulation is required, but this leads to additional energy consumption and complexities in the luminous flux control system.To address these challenges, pulsed power supply systems utilizing pulse-width modulation (PWM) are preferred, as they allow for more efficient and precise control of the luminous flux. This paper examines the parameters of a PWM power supply system with unipolar rectangular pulses and analyzes the dependence of the luminous flux on variations in these parameters. The study establishes that at injection currents ranging from 0.43 to 1.45 mA, the luminous flux increases linearly with a coefficient of k = 0.179, which is attributed to the monomolecular recombination mechanism. As the injection current continues to increase, a nonlinear growth in luminous flux is observed, which follows a third-order polynomial function. These findings provide valuable insights into optimizing the efficiency and stability of semiconductor light sources in various applications. Based on the Fourier series expansion method, as well as the use of digital multimeters and oscilloscopes, an in-depth analysis of the parameters of pulsed LED power supply was performed. This approach made it possible to obtain detailed information about the spectral composition of the signal and the behavior of electrical parameters in dynamic modes of LED operation.

Keywords: pulsed power supply systems, pulse width modulation, luminous flux, injection current

Аналіз досліджень та публікацій

Імпульсні перетворювачі електричної енергії, які використовуються для живлення світлодіодів, в першу чергу базуються на їх динамічних характеристиках. Нажаль дана проблема в літературних джерелах мало висвітлена. В роботі [1] представлені результати дослідження впливу струму інжекції на тривалість процесів післясвічення, що визначається часом життя неосновних носіїв заряду в активній області. Розглянуто вплив процесів безвипромінювальної рекомбінації та витоку носіїв на ефективність.

Залишились поза увагою вплив параметрів імпульсного живлення на динаміку електричних та світлотехнічних характеристик досліджуваних СД.

В роботі [2] розглянуто динаміку післясвічення СД на основі III-нітридних сполук Ga із зміною температури. Дано аналіз температурної залежності часу життя неосновних носіїв заряду в активній області. Приведено частотні характеристики імпульсного живлення, з яких можна визначити оптимальний діапазон частоти слідування імпульсів.

Результати спектрально-часових досліджень світлодіодів на основі GaN, активованих Si та Mg, представлені в роботі [3]. Динаміка післясвічення в них описується експоненціальною залежністю і дозволяє обмежити частоту слідування імпульсів струму живлення f≤20 кГц.

Найбільш обширний аналіз властивостей світлодіодних джерел світла та їх систем живлення дано в оглядовій роботі [4].

Виклад основного матеріалу

Для визначення параметрів імпульсного живлення світлодіодних джерел світла використаємо еквівалентну схему системи світлодіод-джерело напруги та результати теоретичних досліджень, які були представлені в [5].

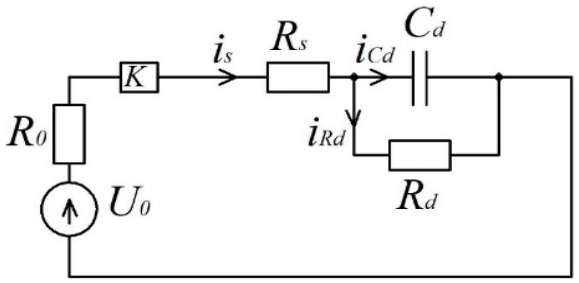


Рис. 1. Еквівалентна схема системи світлодіод-джерело напруги

Еквівалентна схема системи світлодіод-джерело напруги представлено на рис. 1. У цій еквівалентній схемі СД представлений паралельною ланкою, яка складається з R_d, який відповідає опору активної області гетеропереходу, та C_d, ємність якого визначається дифузною ємністю p-n переходу. Послідовно з цією ланкою підключений R_s, який враховує опір пасивних ділянок світлодіода, а також опір провідникових елементів кола живлення. А також на схемі присутній R_0 — внутрішній опір джерела живлення, і ключ K, який з'єднує джерело з СД.

Рівняння, що характеризує струмову зміну в колі зі СД при П-подібному імпульсі представлено наступними рівняннями:

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

$$\tau_1 = \frac{(R_S+R_0)R_dC_d}{R_S+R_0+R_d} = \frac{R_dC_d}{1+\frac{R_d}{R_S+R_0}}, \quad (2)$$

де τ_1 - постійна часу при експоненціальному законі наростання та спадання струму в колі.

Щоб визначити необхідні параметри імпульсного живлення СД, П-подібний періодичний струм з шпаруватістю Q=T/t_i, або з коефіцієнтом заповнення γ=1/ Q, який протікає в колі і зображений на рис 2, розкладемо в ряд Фур'є.

$$I(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{mk}\, sin\, k\, \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_{mk}\, cos\, k\, \omega t, \quad (3)$$

де

$$A_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi\gamma} I_m d\,(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi}2\pi\gamma = I_m\gamma; \quad (4)$$

$$B_{mk} = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi\gamma} I_m\, sin(\,k\omega t) d\,(\omega t) = \frac{I_m}{k\pi}(1 - cos(\,2k\gamma\pi)) \quad (5)$$

$$C_{mk} = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi\gamma} I_m\, cos(\,k\omega t) d\,(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}\left(\frac{sin(k\omega t)}{k}\right)_0^{2\pi\gamma} = \frac{I_m}{k\pi}(sin(\,2k\gamma\pi)). \quad (6)$$

Таким чином, П-подібний імпульсний струм, ми представили синусно-косинусним рядом:

$$I(\omega t) = I_m\gamma + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{I_m}{k\pi}(1 - cos(\,2k\gamma\pi))\, sin(\,k\,\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{I_m}{k\pi}(sin(\,2k\gamma\pi))\, cos(\,k\,\omega t). \quad (7)$$

При розрахунках параметрів електричного кола краще користуватися синусним рядом Фур'є, який записується виразом:

$$I(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk}\, sin(\,k\,\omega t + \psi_k), \quad (8)$$

де

$$A_{mk} = \sqrt{(B_{mk}^2 + C_{mk}^2)}, \psi_k = arctg\left(\frac{C_{mk}}{B_{mk}}\right). \quad (9)$$

Підставивши відповідні значення, отримаємо вирази для коефіцієнтів синусного ряду:

$$A_{mk} = \sqrt{(B_{mk}^2 + C_{mk}^2)} = \sqrt{\left[\frac{I_m}{k\pi}(1 - cos(\,2k\gamma\pi))\right]^2 + \left[\frac{I_m}{k\pi}(sin(\,2k\gamma\pi)\right]^2} = \frac{2I_m}{k\pi}sin(\,k\gamma\pi) \quad (10)$$

$$\psi_k = arctg\left(\frac{C_{mk}}{B_{mk}}\right) = arctg\left(\frac{\frac{I_m}{k\pi}sin(2k\gamma\pi)}{\frac{I_m}{k\pi}[1-cos(2k\gamma\pi)]}\right) == arctg(ctg(k\gamma\pi)). \quad (11)$$

Таким чином синусний ряд Фур'є П-подібного імпульсного струму можна записати виразом:

$$I(\omega t) = I_m\gamma + \sum_{k=1}^{\infty}\left[\frac{2I_m}{k\pi}sin\, k\,\gamma\pi\right] sin(k\omega t + arctg(ctg(k\gamma\pi))) \quad (12)$$

Математичний вираз діючого його значення:

$$I = \sqrt{(I_m\gamma)^2 + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{2}\left(\frac{2I_m}{k\pi}sin(k\gamma\pi)\right)^2} = \sqrt{(I_m\gamma)^2 + \sum_{k=1}^{\infty}2\left(\frac{I_m}{k\pi}sin(k\gamma\pi)\right)^2}. \quad (13)$$

У випадку однополярних П-подібних імпульсів можна цю формулу звести до простішого виразу:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{\gamma T} I_m^2dt} = I_m\sqrt{\gamma}, \quad (14)$$

де γ=1/Q– коефіцієнт заповнення.

Експериментальні результати та їх обговорення

Для експериментальних досліджень використовували комерційно доступні СД FYL-3014-60 мВт синього свічення з максимумом інтенсивності випромінювання при довжині хвилі 450 нм. Імпульсне живлення подавали від генератора Siglent SDG 1050 Для діодів ARPL-1W додатково використовували джерело постійного струму LW-K3010D та електронний ключ. Вимірювання параметрів імпульсного струму проводили за допомогою цифрового мультиметра UNI-T UT8803E Та осцилографа Siglent SDS 1072CML+. Світловий потік вимірювали інтегральним фотометром та фотоелектричним перетворювачем ФЕП, струм якого пропорційний світловому потоку. В якості ФЕП використовували фотоелектронний помножувач ФЕУ 19А, для малих світлових потоків і малих струмів СД і фотодіодом ФД-24К для великих потоків і струмів. Більш детально методика експерименту описана в [6]. На рис. 2 приведені осцилограми струму СД та струму ФЕП, при частоті слідування імпульсів 10 кГц та шпаруватості Q=2.

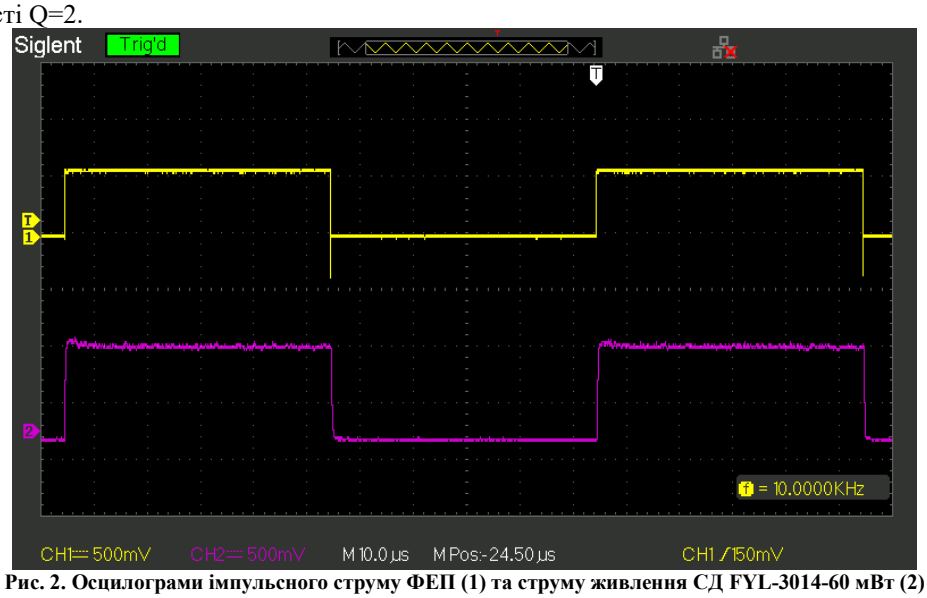


Рис. 2. Осцилограми імпульсного струму ФЕП (1) та струму живлення СД FYL-3014-60 мВт (2)

Для побудови амплітудного спектру імпульсного струму СД було використано експериментальні осцилограми, та їх математичне представлення (12). Розрахунки проводились в середовищі MATLAB. На рис 3 приведено амплітудний спектр імпульсного струму СД для частоти слідування імпульсів f=10 кГц, I_m=23,4 мА та шпаруватістю Q=2.

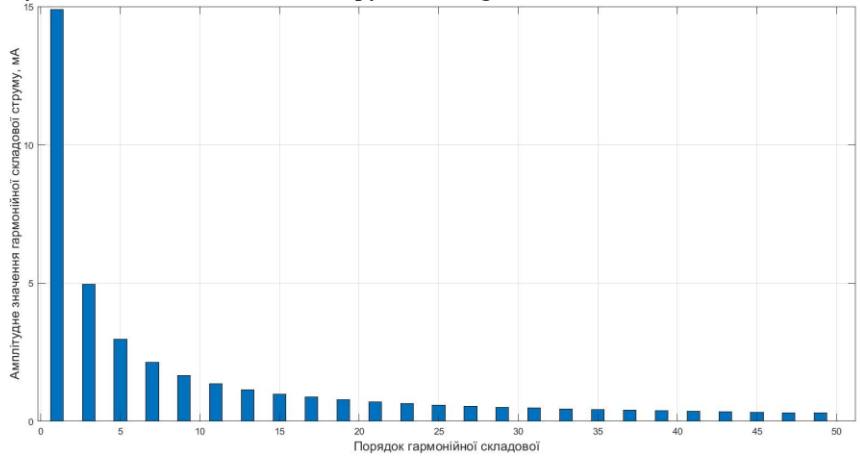


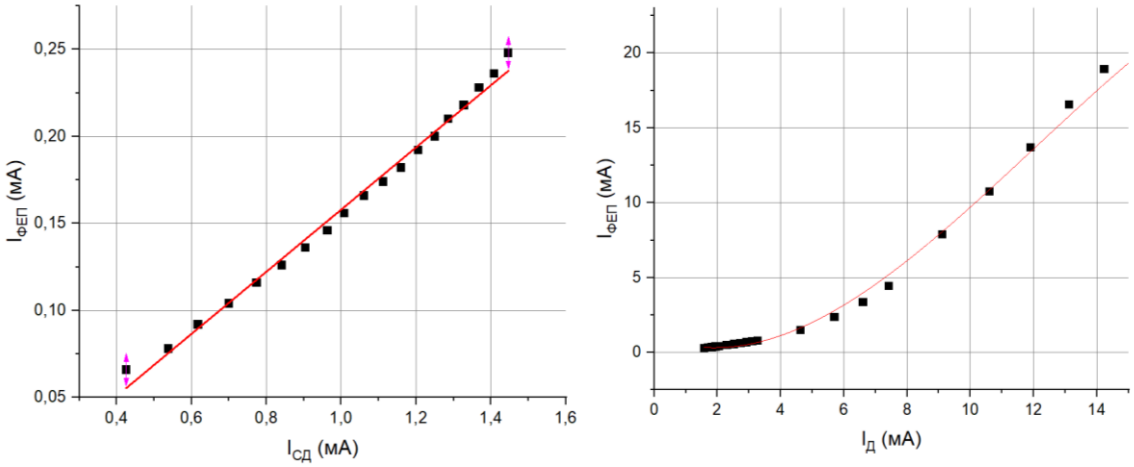
Рис.3. Амплітудний спектр струму живлення СД для частоти слідування імпульсів f=10 кГц, I_m=23,4 мА та шпаруватості Q=2

Для оцінки точності вимірювання середнього та середньоквадратичного значення П-подібного імпульсного струму живлення СД за допомогою мультиметра UNI-T UT8803E було проведено порівняння вимірюваних струмів СД та ФЕП: $I_{СД}$=17,3 мА, $I_{ФЕП}$=23,5 мА з розрахованим діючим значенням струму діода на основі осцилограм за формулами (13) та (14), та середнім значення струму ФЕП який розраховували, виходячи із формули:

$$I_{ФЕП} = \frac{1}{T}\int_0^T i_{ФЕП}dt. \quad (15)$$

В результаті розрахунку отримали: $I_{СД}$=16,51 мА – формула (13); $I_{СД}$=16,54 мА – формула (14); $I_{ФЕП}$=22,8 мА – формула (15).

Різниця між результатами розрахунку (до 50 гармоніки) та результатами вимірювань не перевищувала 5 %. Переконавшись у достовірності результатів вимірювання середньоквадратичного значення імпульсного струму живлення СД та середнього значення струму ФЕП, за допомогою даних приладів були проведені вимірювання залежності $I_{ФЕП}=f(I_{СД})$, які представлені на рис.4.



а) б)

Рис. 4. Залежність $I_{ФЕП}$ від $I_{СД}$ при різних значеннях амплітуди імпульсу напруги

Для діапазону значень $I_{СД}$ в межах 0,43 – 1,45 мА (рис. 4а, при ШІМ живленні, що відповідає зміні коефіцієнта заповнення 0,07 – 0,095, залежність $I_{ФЕП}=f(I_{СД})$ має плавно-зростаючий характер, який можна описати лінійною функцією $I_{ФЕП}$= 0,1785·$I_{СД}$ - 0,0205 з кутовим коефіцієнтом k=0,1785. Коефіцієнт детермінації R^2 при цьому становить 0,992.

Починаючи із струму $I_{СД}$= 1,55 мА зростання світлового потоку має нелінійний характер, і описується полінома третього порядку $I_{ФЕП} = -0{,}00642\, I_{СД}^3 + 0{,}2311\ I_{СД}^2 - 0{,}80277\, I_{СД} + 1{,}05267$з коефіцієнтом детермінації R^2=0,996. (рис. 4б).

Такі ж дослідження були проведені для світлодіодів ARPL-1W. В даному випадку для вимірювання світлового потоку використовували фотодіод ФД-24К з лінійною характеристикою $I_{ФД}=f(Ф)$ для великих світлових потоків. На рис 5 представлено дану залежність.

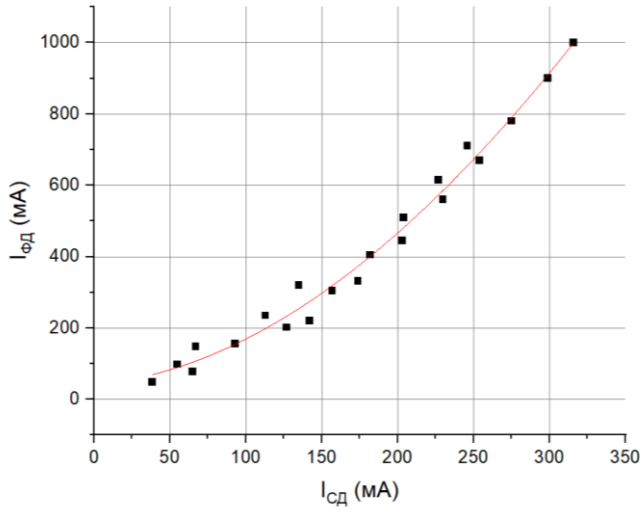


Рис. 5 Залежність $I_{ФД}$ від $I_{СД}$ для світлодіода ARPL-1W

Аналогічно як і для СД FYL-3014-60 мВт залежність $I_{ФД}=f(I_{СД})$ аналітично можна описати кубічним поліномом виду$I_{ФД} = -3{,}00832 \cdot 10^{-6}\ I_{СД}^3 + 0{,}00936\ + I_{СД}^2 0{,}37218\ I_{СД} + 41{,}22846,$ з коефіцієнтом детермінації R^2=0,987.

Висновки

Використовуючи метод розкладу в ряд Фур'є та покази цифрових мультиметрів і осцилограм, проведено аналіз параметрів імпульсного живлення світлодіодів марок FYL-3014-60 мВт та ARPL-1W синього свічення з максимумом при 450 нм та їх вплив на зміну світлового потоку. Встановлено, що при зміні імпульсного струму світлодіода FYL-3014-60 мВт, середньоквадратичне значення якого лежить в діапазоні 0,43 – 1,45 мА, зростання світлового потоку можна описати лінійною функцією $I_{ФЕП}$= 0,1785·$I_{СД}$ - 0,0205, що пояснюється мономолекулярним механізмом рекомбінації неосновних носіїв заряду, інжектованих в активну область гетеропереходу. Подальше зростання струму інжекції викликає нелінійне зростання світлового потоку, що можна описати за допомогою полінома третього порядку $I_{ФЕП} = -0{,}00642\ I_{СД}^3 + 0{,}2311\ I_{СД}^2 - 0{,}80277\ I_{СД} + 1{,}05267$ з коефіцієнтом детермінації R^2=0,996.

Для світлодіода ARPL-1W залежність світлового потоку також описується поліномом третього порядку $I_{ФД} = -3{,}00832 \cdot 10^{-6}\ I_{СД}^3 + 0{,}00936\ + I_{СД}^2 0{,}37218\ I_{СД} + 41{,}22846$.

Література

1. **Meng, X.** Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis / X. Meng, L. Wang, Z. Hao, Y. Luo, C. Sun, Y. Han, B. Xiong, J. Wang, H. Li // *Applied Physics Letters.* – 2016. – **Vol. 108**. – DOI: 10.1063/1.4939593.
2. **Farr, P.** Unity quantum efficiency in III-nitride quantum wells at low temperature: Experimental verification by time-resolved photoluminescence / P. Farr, S. Sidikejiang, P. Horenburg, H. Bremers, U. Rossow, A. Hangleiter // *Applied Physics Letters.* – 2021. – **Vol. 119**. – DOI: 10.1063/5.0055368.
3. **Chichibu, S. F.** The origins and properties of intrinsic nonradiative recombination centers in wide bandgap GaN and AlGaN / S. F. Chichibu, A. Uedono, K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, S. Takashima, M. Edo, K. Ueno, S. Ishibashi // *Journal of Applied Physics.* – 2018. – **Vol. 123**. – DOI: 10.1063/1.5012994.
4. **Schubert, E. F.** *Light-Emitting Diodes.* 2nd ed. – Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York: Cambridge University Press, 2006.
5. **Andriychuk, V. A.** Research of transient processes in an electric circuit with a LED / V. A. Andriychuk, L. M. Kostyk, Y. O. Filiuk, M. S. Nakonechnyi // *Technical Electrodynamics.* – 2024. – **Issue 2**. – P. 87-93. – DOI: 10.15407/techned2024.02.087.
6. **Андрійчук, В. А.** Дослідження світлодіодних джерел світла у випадку імпульсного живлення / В. А. Андрійчук, М. С. Наконечний, Я. М. Осадца, Я. О. Філюк // *Технічна електродинаміка.* – 2021. – **№1**. – С. 68-72. – DOI: 10.15407/techned2021.01.068.

Reference

1. Xiao Meng. Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis / Xiao Meng, Lai Wang, Zhibiao Hao, Yi Luo, Changzheng Sun, Yanjun Han, Bing Xiong, Jian Wang, and Hongtao Li // Applied Physics Letters. – 2016. – Volume 108. – doi: 10.1063/1.4939593
2. Philipp Farr. Unity quantum efficiency in III-nitride quantum wells at low temperature: Experimental verification by time-resolved photoluminescence / Philipp Farr, Shawutijiang Sidikejiang, Philipp Horenburg, Heiko Bremers, Uwe Rossow, Andreas Hangleiter // Applied Physics Letters. – 2021. – Volume 119. – https://doi.org/10.1063/5.0055368
3. Chichibu S. F. The origins and properties of intrinsic nonradiative recombination centers in wide bandgap GaN and AlGaN / S. F. Chichibu, A. Uedono, K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, S. Takashima, M. Edo, K. Ueno and S. Ishibashi // Journal of Applied Physics. 2018. – Volume 123. – doi: 10.1063/1.5012994.
4. Schubert E. F. Light-emitting diodes second edition / E. F. Schubert // Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York. – 2006.
5. Andriychuk V.A. Research of transient processes in an electric circuit with a led / V.A. Andriychuk, L.M. Kostyk, Y.O. Filiuk, M.S. Nakonechnyi // Technical Electrodynamics. – 2024. – Issue 2. – P. 87-93. – DOI:https://doi.org/10.15407/techned2024.02.087
6. Andriychuk V.A. Behavior of Led Light Sources in Pulse Power / V.A. Andriychuk, M.S. Nakonechnyi, Y.M. Osadtsa, Y.O. Filiuk // Technical Electrodynamics. – 2020. – Issue 1. – P. 68-72. – DOI:https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068.