

I.T. Kogut¹, T.M. Dem'yanchuk²

Комп'ютерне моделювання перехідних процесів у світлодіодних модулях

¹Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки,
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна,
igor.kohut@pnu.edu.ua

²ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО», Науково-виробничий департамент АСУ ТП, м. Київ, Україна,
tamataka@ukr.net

У роботі проведено теоретичний аналіз та практичне дослідження перехідних процесів, що протікають при включенні світлодіодних модулів. Світлодіодні (англ. LED) модулі являють собою паралельне, послідовне чи змішане з'єднання окремих світлодіодів у дискретному або в інтегральному виконанні. Показано нерівномірність падіння напруги в момент включення на послідовно з'єднаних світлодіодах чи послідовно з'єднаних світлодіодних комірках, що містять паралельно з'єднані світлодіоди. Це може бути причиною короткочасного електричного пробоя їх р-п переходів. Отримані результати можуть бути корисними для прогнозування довговічності та надійності світлодіодних пристроїв.

Ключові слова: світлодіод, світлодіодний модуль, моделювання перехідних процесів у світлодіодних модулях.

Подано до редакції 12.01.2024; прийнято до друку 15.05.2024.

Вступ

Світлодіодні модулі з різними конфігураціями з'єднань світлодіодів мають широке застосування у багатьох галузях. Дослідження перехідних процесів у момент включення світлодіодів цікаві тим, що можуть допомогти збільшити термін їх експлуатації. Функціонування світлодіодів, як окремих, так і світлодіодних модулів з різними типами з'єднань описано в літературі, зокрема в [1-4]. Показано, що при подачі прямої напруги на р-п перехід у світлодіоді, присутня затримка в його активації (затримка прямого включення). Проте не вказано вплив цієї затримки на величину падіння напруги на р-п переході під час перехідних процесів та імовірність електричного пробоя. В літературі описуються перехідні процеси в початковий момент включення послідовно з'єднаних елементів [5]. Але не достатньо розглянуті перехідні процеси в момент включення послідовно з'єднаних світло-діодів. Дана

робота присвячена теоретичному аналізу і практичному дослідженню впливу затримки включення світлодіода на величину зміни падіння напруги на його р-п переході. Це стосується як одиночних так і послідовно з'єднаних світлодіодів і ймовірність їх електричного пробоя в цей момент [9-12]. Також визначено можливі граничні величини падіння напруги на р-п переходах світлодіодів в реальних пристроях.

I. Теоретичний аналіз перехідних процесів у світлодіодних модулях

Перехідні процеси на стадії включення світлодіодів.

Способи з'єднання світлодіодів (паралельно, послідовно чи змішано), перехідні процеси, які проходять при їх включенні, а також вплив температури на теплові пробої і довговічність світлодіодів описано в [1-4]. У [5-6] показано, що при

подачі напруги на р-п перехід світлодіода, починається зміна взаємного розташування енергетичних зон і їх наступного заповнення електронами чи дірками до моменту рекомбінації із подальшим випромінюванням квантів світла, тобто має місце затримка включення світлодіода. Проте, не наведено результатів впливу цієї затримки включення на величину падіння напруги на закритому р-п переході.

Отже, перехідні процеси на початковій стадії включення протікають не миттєво, а з певною затримкою. Тобто, в момент замикання ключа К (рис. 1), поки р-п перехід ще закритий, протікає тільки струм втрат I_w (момент часу t_1 , рис. 2). Цей струм на декілька порядків менший порівняно з прямим робочим струмом відкритого світлодіода I_{vd} в режимі свічення. В момент часу t_v , коли р-п перехід світлодіода VD_1 став відкритим і він випромінює світло, на ньому падає напруга U_{vd} , величиною в межах 3,3V. Величина напруги джерела живлення $U_g = U_{vd} + U_o$, де $U_o = R_1 I_{vd}$. Величину напруги джерела живлення вибирають за умови $U_g > U_{vd}$, тобто $U_g = g U_{vd}$, де g – коефіцієнт рівний або більший за 1,3. Якщо вибрано $g = 1,3$, тоді $U_g = 1,3 U_{vd}$. А величина обмежуючого резистора $R = 0,3 U_{vd} / I_{vd}$.

Тобто, в початковий момент часу t_1 струм $I_w \ll I_{vd}$, і падіння напруги на обмежуючому резисторі R буде рівним $U_o = R I_w$ і ним можна знехтувати. Тоді на світлодіоді VD_1 падає напруга $U_1 = U_g$. Якщо напруга живлення U_g буде вищою від напруги електричного пробію р-п переходу U_p , то відбувається електричний пробій. Види пробію р – п переходу описані в [5-6]. Час електричного пробію залежить від швидкодії включення світлодіода

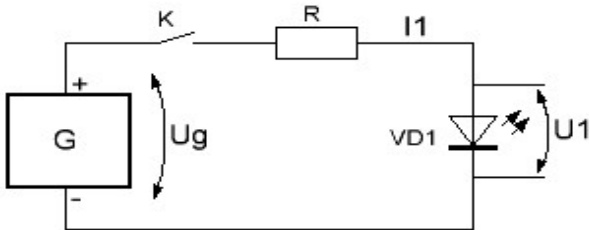


Рис. 1. Електрична схема підключення.

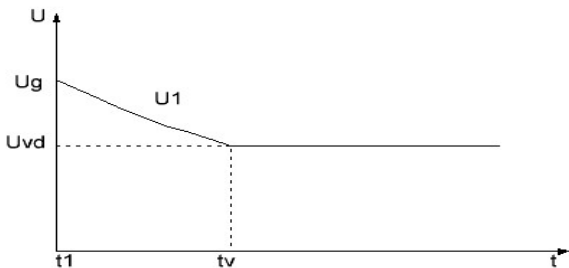


Рис. 2. Часова діаграма процесу зміни падіння напруги світлодіода до джерела живлення напруги U_1 на світлодіоді в момент включення.

На рис. 1 і 2 позначено: G – джерело живлення; VD_1 – світлодіод; K – ключ; R – обмежуючий резистор; U_g – напруга джерела живлення; U_1 – падіння напруги на світлодіоді; I_{vd} , і U_{vd} відповідно струм і напруга на включеному світлодіоді після

закінчення перехідного процесу; t_1 – момент часу, коли ключ К – замкнув ланцюг; t_v – момент часу, коли закінчився перехідний процес і включився світлодіод.

При паралельному з'єднанні декількох світлодіодів, ситуація залишається аналогічною, тобто $U_1 = U_g$. А коли напруга живлення U_g більша від напруги електричного пробію U_p одного з світлодіодів, то відбувається короткочасний електричний пробій р-п переходу власне цього світлодіода.

Для послідовно з'єднаних світлодіодів, за умови, що їх параметри однакові, а величина напруги джерела живлення вибрана як $U_g = 1,3n U_{vd}$, де n – кількість послідовно підключених світлодіодів.

Тоді в початковий момент часу t_1 , коли протікає тільки струм втрат I_w , до їх р-п переходів прикладається однакова напруга U_m , величиною $U_m = U_g / n = 1,3 U_{vd}$ (рис. 3). Тобто:

$$U_m = U_1 = U_2 = \dots = U_n.$$

Прим. Якщо величина напруги джерела живлення U_g буде більшою, а саме $g > 1,3$. В цьому випадку $U_g > 1,3n U_{vd}$. Тоді й результати аналізу будуть іншими, і величина падіння напруги на р–п переході в процесі включення світлодіода теж буде більшою.

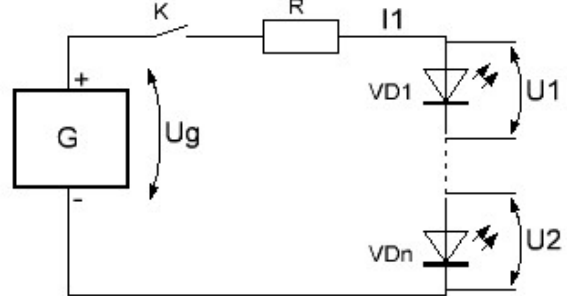


Рис. 3. Електрична схема n послідовно з'єднаних світлодіодів.

В реальних світлодіодах параметри відрізняються, тому розглянемо наступні випадки:

а). У світлодіодів різні струми втрат при закритому р-п переході. Припустимо, що ці струми розподілились наступним чином, найбільший в першому світлодіоді, а найменший в n-ному. Тобто $I_{w1} > I_{w2} > \dots > I_{wn}$. Тоді, в момент часу t_1 , падіння напруги на їх р-п переходах будуть зворотно пропорційні їх струмам втрат. Тобто $U_n > U_{n-1} > \dots > U_1$, і на деяких світлодіодах, величина падіння напруги буде більша, а на де яких менша від U_m . Тому ймовірність електричного пробію закритого р-п переходу збільшується для тих світлодіодів, падіння напруги на яких є більшою за U_m , і перевищує величину напруги пробію U_p .

б). Світлодіоди мають різні величини затримок включення. Припустимо, що найбільша затримка включення t_1 у одного світлодіода, а у всіх решти менша і однакова. Наприклад,

$$t_1 > t_2 = t_3 = \dots = t_n.$$

В момент часу t_1 величина падіння напруги на світлодіодах буде розподілена згідно вказаної у пункті а). Але в наступні моменти часу, величина падіння

напруги на світлодіодах буде залежати від величини затримки їх включення, бо у світлодіодів з меншою затримкою включення, проходять швидші зміни взаємного розташування енергетичних зон і їх заповнення електронами чи дірками. Величина падіння напруги на світлодіоді з меншою затримкою включення скоріше буде наближатись до величини напруги включеного світло-діода U_{vd} .

Розглянемо момент часу, коли величина падіння напруги на світлодіодах з меншою затримкою наблизилась до значення напруги його включення U_{vd} , хоча саме включення ще не наступило. Тоді, в цей момент часу, величина падіння напруги на світлодіоді з більшою затримкою включення U_x визначається наступним чином:

$$U_g = (n - 1) U_{vd} + U_x; \text{ тоді } U_x = U_g - n U_{vd} + U_{vd};$$

Якщо $U_g = 1,3n U_{vd}$; то $U_x = (1+0,3n) U_{vd}$; Це максимально можлива величина падіння напруги на закритому р-n переході в момент його включення. Вона може спричинити короточасний електричний пробій р-n переходу. Якщо у світлодіодів різна величина затримки включення $\tau = t_v - t_1$, наприклад, $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 > \dots > \tau_n$, то й величина падіння напруги на їх р - n- переходах буде різною, тобто $U_n < \dots < U_3 < U_2 < U_1 < U_x$; і в частині світлодіодів, з більшою затримкою включення, може наступити електричний пробій.

Оскільки електричний пробій р-n переходів у світлодіодах короточасний, то можна вважати, що він оборотний і може відновлюватися. Проте, після великої кількості короточасних електричних пробіів р-n переходу, у світлодіодах наступає катастрофічна відмова чи зменшення яскравості свічення.

II. Комп'ютерне моделювання перехідних процесів в елементах світлодіодних модулів

Схемо технічним моделювання перехідних процесів в елементах світлодіодних модулів проводили в САПР LT SPICE, а моделювання з врахуванням особливостей топології світлодіодів в інтегральному виконанні – в САПР Micro Wind. Для комп'ютерного моделювання запропоновано еквівалентну електричну схему світлодіода, зображену на рис. 4. Схема містить котушку індуктивності $L1(3mkH)$, резистор $R1(10 Om)$, (еквівалент опору включеного світлодіода) резистор $R2$ (еквівалент опору втрат світлодіода), V_{in} – джерело живлення світлодіода, $R3(10 Om)$ – обмежуючий резистор джерела живлення. Опір втрат становить приблизно 1 МОм. На еквівалентній схемі вказані орієнтовні значення величин.

III. Практичне дослідження результатів впливу перехідних процесів у момент включення світлодіодів на їх роботу

Для практичних досліджень окремих світлодіодів можуть бути використані комп'ютеризована гібридна мікросистема для біомедичних застосувань [7], що містить прецизійний операційний підсилювач на основі КМОН-транзисторів та принцип цифрового вимірювання струмів описаний в [8].

Дослідження проводилось на трьох різновидностях побутових освітлювальних приладів з

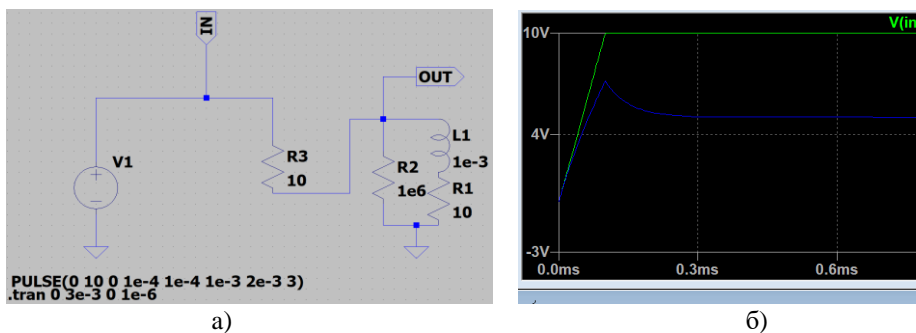


Рис. 4. Еквівалентна електрична схема (а) і результати комп'ютерного моделювання одного світлодіода (б).

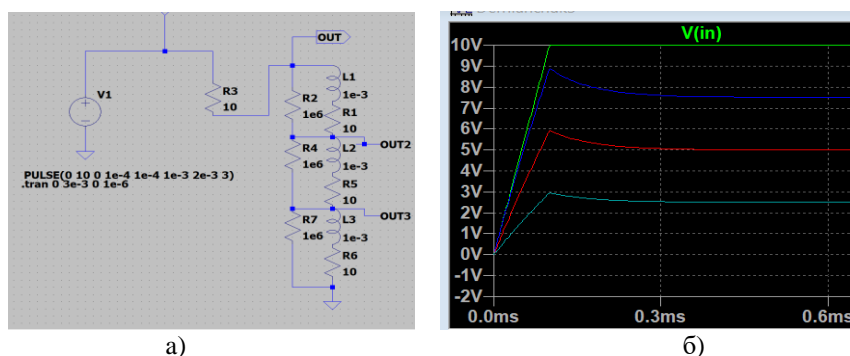


Рис. 5. Еквівалентна електрична схема (а) і результати комп'ютерного моделювання трьох послідовно з'єднаних світлодіодів (б).



Рис. 6. Лампочка з 6 –ти світлодіодів.



Рис. 7. Лампочка з 28 світлодіодів та електронний драйвер на обмежуючому конденсаторі (зліва).

світлодіодами, це:

а) Лампочки, з живленням від мережі змінного струму 220V. В експлуатації біля трьох років.

б) Світильники, з живленням від мережі змінного струму 220V. В експлуатації біля двох років.

в) Стрічки, з живленням від джерела постійного струму напругою 12V. В експлуатації біля одинадцяти років.

Спостереження за роботою приладів проводилось в процесі їх експлуатації. Було виявлено, що поломка одних приладів відбувалася при включенні, а інших під час їх роботи.

Результати аналізу.

З понад п'ятдесяті несправних приладів, для дослідження вибрано біля сорока. Це ті, в яких були справні блоки живлення (драйвери) але не працювали світлодіоди. Таким чином, з дослідження були виключені прилади, світлодіоди яких могли пошкодити несправні драйвери.

В приладах, поломка яких відбувалася при включенні джерела живлення, як правило, були виявлені обриви в одному чи декількох світлодіодах. Візуально їх зовнішній вигляд не зазнавав змін, тобто настував електричний пробій р-п переходу. В деяких випадках було виявлено, що крім світлодіодів з електричним пробієм був послідовно з'єднаний світлодіод, який мав коротке замикання (тепловий пробій, візуально видно почорнілий світлодіод).

Якщо поломка приладу наступала під час певного часу роботи, то були виявлені теплові пробої (візуально видно почорнілі чи зруйновані світлодіоди). В деяких приладах тепловий пробій був у одного з послідовно з'єднаних світлодіодів. Діод мав обрив. Також, в деяких випадках (у комірках з паралельними світлодіодами) у одного світлодіода був тепловий пробій (почорніння і обрив), а у решти були електричні пробої (обрив, без візуально видимих змін).

Можна окремо виділити такі випадки, як зменшення яскравості свічення світлодіода. Візуально зовнішніх змін не видно, що свідчить про часткове пошкодження світлодіода при електричних пробоях. Коли наступала така поломка, чи в момент включення чи під час роботи, встановити не вдалося.

Прим. Не виключено що теплові пробої могли бути наслідками попередніх електричних пробіїв. Види відмов світлодіодів у такі приладах як:

а) Лампочки. Досліджувалося біля 25 лампочок. У них, як правило, світлодіоди підключені послідовно. Їх кількість від 4 до 30, і залежить від потужності лампочки. Більша потужність випромінювання –

більше світлодіодів. Драйвери різноманітні: від простих, з обмежуючим конденсатором по мережевому струму, до складних електронних стабілізаторів постійного струму. На рис. 6, 7 показана внутрішня будова деяких лампочок.

Виявлені наступні несправності світлодіодів:

- електричний пробій (обрив) у одному чи в декількох послідовно з'єднаних світлодіодах. Поломка наступила під час включення приладу.

- тепловий пробій (обрив) у світлодіоді. Поломка наступила в процесі функціонування приладу.

- тепловий пробій (коротке замикання) у світлодіоді, та електричний пробій (обрив) у одному чи декількох інших послідовно підключених світлодіодах. Поломка наступила під час включення приладу. Тепловий пробій світлодіода, скоріш за все, наступив раніше, але його коротке замикання суттєво не вплинуло на функціонування приладу. Бо в послідовному ланцюгу коротке замикання одного чи декількох світлодіодів не виключає продовження протікання струму через справні світлодіоди.

Прим. Як приклад, проаналізуємо поломку лампочки з шести ($n = 6$) світлодіодів, показану на рис. 6. Поломка настала в момент включення. Один з світлодіодів в обриві, а його зовнішній вигляд не змінився. Величина вихідної напруги драйвера, без навантаження, біля 200 V. Тобто виробником вибрано величину напруги джерела живлення з коефіцієнтом $g > 1,3$ ($g = U_g / nU_{vd} = 200/6 \cdot 3,3 = 10,1$).

Якщо параметри цих світлодіодів у лампочці були однакові, то максимально можлива величина падіння напруги на закритому р-п переході, в момент включення, $U_m = U_g/n = 200/6 = 33,3V$. При різних параметрах світлодіодів величина падіння напруги на закритому р-п переході могла досягти значення $U_x = U_g - n U_{vd} + U_{vd} = 200 - (6 \cdot 3,3) + 3,3 = 176,9 V$. Такі величини падіння напруги на світлодіодах, в момент включення, і привело до поломки лампочки.

б) Світильники. У світильниках використовуються декілька лінійок з послідовно з'єднаними комірками світлодіодів. Кількість комірок у лінійці 7-10 шт. Кожна комірка має декілька паралельно підключених світлодіодів. Кількість лінійок, комірок і світлодіодів у комірці, залежить від потужності випромінювання світильника. Живлення поступає від драйвера (стабілізатор постійного струму). У світильниках використовувались різні типи драйверів. Дослідження проводилось на десяти світильниках. На рис. 8, 9 показані частини лінійок з несправними світлодіодами.

Виявлені наступні несправності світлодіодів:

- електричний пробій (обрив) у всіх світлодіодах



Рис. 8. Частина лінійок з електричним пробоем комірки (4 паралельно підключених світлодіодів).



Рис. 9. Частина лінійок з тепловим з пробоем світлодіодів у комірці.

однієї чи більше комірок. Поломка зафіксована під час включення світильника (рис. 8).

- тепловий пробій з коротким замиканням в одному світлодіоді комірки і електричним пробоем (обривом) у решти паралельно включених світлодіодів (ліва лінійка рис. 4). Поломка виявлена візуально, під час роботи світильника. Прилад функціонував, але візуально видно було поломку однієї з комірок.

- тепловий пробій з обривом одного світлодіода в комірці і електричний пробій в решти паралельно підключених світлодіодів (права лінійка рис. 4). Поломка виявлена під час роботи, коли погас світильник. Можна припустити, що першопричиною теплових пробіів був електричний пробій всіх паралельно включених світлодіодів, крім одного. А потім, під час роботи, наступив тепловий пробій вцілілого світлодіода. Це сталося тому, що через нього став протікати сумарний струм, його робочий плюс струми паралельних світлодіодів з обривом.

Прим. У приладах, розглянутих в пунктах с) і д), крім перелічених поломок, попадались і світлодіоди зі зменшеною яскравістю світлення.

в) Стрічки з живленням від джерела постійного струму напругою 12V. У стрічках використовується різна кількість паралельно включених комірок. Кожна комірка складається з трьох послідовно з'єднаних світлодіодів, підключених через обмежувачий резистор величиною 110-150 Ом до джерела живлення.

В даному дослідженні аналізувались стрічки (5 шт.), в яких було від сорока до ста комірок. Стрічки отримували живлення від різних типів джерел. В двох стрічках, під час включення, було виявлено по одній несправній комірці (рис. 5).

В кожній з несправних комірок був електричний пробій (обрив) одного світлодіода.

Таким чином:

- крім теплового пробією від перегріву, в побутових освітлювальних приладах, має місце і електричний пробій світлодіодів, що підтверджує результати проведеного теоретичного аналізу;

- довговічність роботи стрічок на світлодіодах, з живленням від джерела постійного струму напругою 12 V, значно перевищує довговічність приладів з більшою напругою живлення. Це пов'язано з тим, що при будь-якій розбіжності параметрів світлодіодів комірки, величина падіння напруги на одному з

світлодіодів не більша 12 V, що зменшує ймовірність електричного пробією;

- електричний пробій в світлодіодах різноманітних освітлювальних приладів, від мережі змінного струму 220 V, не сильно залежить від типу використовуваних джерел живлення;

- тепловий пробій в комірках може бути наслідком електричного пробією частини паралельно включених світлодіодів.



Рис. 10. Частина світлодіодної стрічки з несправною коміркою.

Висновки

В результаті проведеного дослідження і аналізу встановлено, що у послідовно з'єднаних світлодіодів, затримка їх включення може привести до перевищення допустимої напруги на р-п переході, тобто до його електричного пробією.

Відмічено, що:

- крім теплового пробією від перегріву, в побутових освітлювальних приладах на світлодіодах, має місце і електричний пробій світлодіодів.

- довговічність роботи стрічок на світлодіодах, з живленням від джерела постійного струму напругою 12 V, значно перевищує довговічність приладів з більшою напругою живлення. Це пов'язано з меншою ймовірністю, у них, електричного пробією.

- електричний пробій в світлодіодах різноманітних освітлювальних приладів, від мережі змінного струму 220 V, мало залежить від типу використовуваних джерел живлення.

- тепловий пробій світлодіодів в комірках може виникати і через електричний пробій паралельно включених сусідніх світлодіодів.

- при включенні послідовно з'єднаних світлодіодів, на частині з них, проходить короткочасний електричний пробій. Тому, з часом, багаторазове включення приводить до катастрофічної

відмови, тобто до обриву у світлодіодах, або до зменшення їх яскравості. Це стосується не тільки побутових освітлювальних приладів, а й інших, де використовується послідовне з'єднання світлодіодів. Наприклад, як у LED телевізорів, де для підсвічування екрану використовуються лінійки з послідовно підключеними світлодіодами. В них теж є аналогічні відмови.

Зменшення кількості поломок приладів, через електричний пробій світлодіодів, можна досягти:

Використанням світлодіодів з однієї партії (де незначне відхилення величини електричних

параметрів).

Вирівнюванням струмів втрат світлодіодів з допомогою паралельно підключених резисторів.

Використанням паралельного включення світлодіодів з живленням від джерел з низькою напругою, де це можливо.

Виробництвом світлодіодів з збільшеною напругою пробою р – n переходу.

Когут І.Т. – доктор технічних наук, професор;

Дем'яничук Т.М. – кандидат технічних наук.

- [1] Web-source: <https://5watt.ua/uk/blog/statti/zastosuvannya-svitlodiodiv-u-osvitleni> *Application of light diodes in lighting.*
- [2] L. V. Odnodvoret, I. M. Pazukha, *Materials and components of functional electronics: Sumy State University study guide* (Sumy, 2020).
- [3] O. V. Borisov, Yu. I. Yakymenko. *Solid-state electronics: a textbook* (NTUU "KPI", Kyiv, 2015).
- [4] How to connect a light diode: parallel and series connection. Web-sources: <https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/a400222-kak-podklyuchit-svetodiod.html>.
- [5] P-n junction, its properties, types of breakdowns. Web-source: <http://um.co.ua/8/8-5/8-59953.html>.
- [6] Breakdown of the r-p-transition. Web-source: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/3pavlov_osnovy_mikroelektroniky/68.htm.
- [7] B.S. Dzundza, I.T. Kogut, V.I. Golota, L.V. Turovska, M.V. Deychakivskyi, *Principles of construction of hybrid microsystems for biomedical applications*, *Physics and chemistry of the solid state*, 23(4), 776 (2022); <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-784>.
- [8] A.O. Druzhynin, V.I. Holota, I.T. Kogut, S.V. Sapon, Khoverko, Yu.M. *The device-technological simulation of the field-emission micro-cathodes based on three-dimensional SOI-structures*, *ECS Transactions*, 14(1), 569 (2008); <https://doi.org/10.1149/1.2956075>.
- [9] Jinmin Li, G.Q. Zhang. *Light-Emitting Diodes Materials, Processes, Devices and Applications* (Springer, Cham, 2019).
- [10] Qing Wan., Wenxin Dai., Yili Xie., Qinqin Ke., Chunhui Zhao., Bing Zhang., Zebing Zeng., Zhiming Wang., Ben Zhong Tang. *AIE-active deep red/near-infrared electroluminescent emitters with fine regulation of excited state*, *Chemical Engineering Journal*. 451(1), 138529 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138529>.
- [11] M. Khan, S. Shah, *Data and information visualization methods and interactive mechanisms: a survey*, *Inter. J. Comp. Appl.*, 34(1), 1 (2011); <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4ff1f2fff62e899f4b9f507b2eb4bb297b7febc2>.
- [12] G. Liu, Z. Li, X. Hu, Y. Qin, C. S. Lee, D. Chen, ... & Y. Wang, *Efficient and stable one-micrometre-thick organic light-emitting diodes*, *Nature Photonics*, 16(12), 876-883 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01084-x>.

I.T. Kogut¹, T.M. Demyanchuk²

Computer modeling of transient processes in LED modules

¹*Department of Computer Engineering and Electronics, Vasyl Stefanyk Prekarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, igor.kohut@pnu.edu.ua*

²*LLC "EMB-ENERGO", Scientific and Production Department of ACS TP, Kyiv, Ukraine, tamataka@ukr.net*

In this paper, a theoretical analysis and a practical study of the transient processes occurring when the LED modules are switched on are carried out. Light-emitting diode (LED) modules are a parallel, serial or mixed connection of individual light-emitting diodes in a discrete or integrated design. The non-uniformity of the voltage drop at the moment of switching on series-connected LEDs or series-connected LED cells containing parallel-connected LEDs is shown. This may be the reason for a short-term electrical breakdown of their p-n junctions. The obtained results can be useful for predicting the durability and reliability of LED devices.

Keywords: LED, LED module, simulation of transient processes in LED modules.