

УДК 620.9.004.18

А.О. МОРОЗОВ\*, В.П. КЛИМЕНКО\*, **В.Б. КОРБУТ\***, М.Г. ІЄВЛЄВ\*, В.Г. БУТКО\***РОЗРОБКА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ СВІТЛОДІОДНОГО  
ОСВІТЛЕННЯ ДЛЯ ВАГОНІВ МЕТРО**

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** *Описані основні технічні рішення, використані при розробці і впровадженні енергозберігаючих світлодіодних систем освітлення вагонів метро Куренівсько-Червоноармійської лінії Київського метрополітену, і результати експлуатації систем освітлення вагонів метро, розроблених і впроваджених ІПММС. Установлено, що у порівнянні зі стандартними системами освітлення з люмінесцентними світильниками світлодіодні системи забезпечують економію електроенергії в 3,5 рази і збільшення освітленості більше ніж у 1,5 рази.*

**Ключові слова:** енергозбереження, світлодіод, освітлювальні системи, освітлювальні пристрої, джерела живлення, освітленість.

**Аннотация.** *Описаны основные технические решения, использованные при разработке и внедрении энергосберегающих светодиодных систем освещения вагонов метро Куренёвско-Красноармейской линии Киевского метрополитена, и результаты эксплуатации систем освещения вагонов метро, разработанных и внедренных ИПММС. Установлено, что по сравнению со стандартными системами освещения с люминесцентными светильниками светодиодные системы обеспечивают экономию электроэнергии в 3,5 раза и увеличение освещенности больше чем в 1,5 раза.*

**Ключевые слова:** энергосбережение, светодиод, осветительные системы, осветительные устройства, источники питания, освещенность.

**Abstract.** *The main technical solutions used under the development and implementation of energy-saving LED lighting systems for metro coaches of the Kurenivsko-Chervonoarmiyska Lines of Kyiv Metro, and the results of operating lighting systems for metro coaches developed and implemented by IPMMS are described. It is established that compared to standard lighting systems with fluorescent lamps, LED systems provide energy savings of 3,5 times and an increase in illumination more than 1,5 times.*

**Keywords:** energy-saving, LED, lighting systems, lighting devices, power supplies, illumination.

**1. Вступ**

Більшість існуючих систем освітлення до недавнього часу виконувались на лампах розжарення, люмінесцентних та галогенових лампах, які мають багато вад, у тому числі велике тепловиділення, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, велике споживання електроенергії, необхідність частої заміни ламп, які вийшли з ладу. Ці вади відсутні у світлодіодних світильниках.

У провідних країнах світу широко впроваджуються світлодіодні джерела світла, які дозволяють значно зменшити витрати електроенергії на освітлення, а також скоротити витрати на обладнання електромереж і освітлювальне обладнання, підвищити екологічну безпеку. В останні роки в Україні також широко впроваджуються світлодіодні системи освітлення у промисловості, на транспорті, в комунальній сфері [1].

На замовлення комунального підприємства «Київський метрополітен» Інститут проблем математичних машин і систем НАН України (ІПММС НАН України) розробив енергозберігаючу світлодіодну систему салонного освітлення вагонів метро моделей 81-

717, 81-714. Розробленими світлодіодними модулями переобладнані 50 вагонів Куренівсько-Червоноармійської лінії Київського метрополітену.

## 2. Вибір світлодіодів для освітлювальних пристроїв вагонів метро

На сьогоднішній день на вітчизняному ринку доступні світлодіоди усіх відомих світових виробників. Це світлодіоди фірм Osram, Philips Lumiled, Edison Opto, Cree та ін. Маючи майже однакові світлові параметри, вони відрізняються один від одного суто електричними параметрами, такими як споживана потужність, пряме падіння напруги  $U_{np}$  при нормованому прямому струмі  $I_{np}$  (у технічній документації виробників  $I_{np} = 350$  мА), максимальна робоча температура та тепловий опір – на межі кристал-тепловідвід. Гарантований строк безвідмовної роботи світлодіодів майже усі виробники дають однаковий – 100 000 годин.

Ще одним, дуже важливим, чинником для розробника освітлювальних пристроїв є ціна люмена. Цю цифру можна отримати, розділивши вартість світлодіода (грн) на його світлову віддачу (лм).

Отже, критерій вибору світлодіодів для освітлювальних пристроїв можна сформулювати таким чином: використовувати світлодіоди з найбільшою ефективністю лм/Вт при прямому струмі 350 мА, які мають найменше пряме падіння напруги, найвищу робочу температуру, найменший тепловий опір та мінімальну ціну люмена. В деяких випадках має велике значення ще один чинник, а саме, максимальний прямий струм, при якому може працювати світлодіод. Як бачимо, цей критерій має багато протиріч. І перше з них у тому, що світлодіоди з найбільшою ефективністю мають і найвищу ціну люмена. Тому завжди треба знаходити розумні компроміси при виборі світлодіодів різних виробників. Іноді вигідніше використати в освітлювальному приладі більше менш ефективних, але дешевших світлодіодів, замість меншої кількості більш ефективних, але значно дорожчих.

Порівняння ціни люмена у схожих світлодіодів різних виробників показує, що найвища ціна люмена у фірми Osram, а найменша – у фірми Cree. При цьому світлодіоди фірми Cree мають прийнятну, для наших застосувань, ефективність (114–120 лм/Вт), пряме падіння напруги 3 В при струмі 350 мА, високу робочу температуру та низький тепловий опір [2].

У технічному завданні на заміну люмінесцентних ламп у вагонах Київського метрополітену на світлодіодні світильники були дуже жорсткі вимоги до потужності, яку споживає система освітлення вагона, при освітленості на рівні сидінь 110 лк. Ця потужність обмежувалась рівнем 300 Вт. Саме тому для реалізації цього проекту були вибрані світлодіоди фірми Cree. В результаті було отримано споживану потужність 257 Вт, забезпечивши освітленість на рівні сидінь 160 лк, що повністю задовольняє вимогам Санітарно-епідеміологічних правил СП 2.5.1337-03.

## 3. Розробка джерела живлення для освітлювальних приладів

Технічне завдання на розробку системи освітлення вагонів метрополітену серій 81-714, 81-717 обумовлює живлення світильників від бортової мережі вагона з напругою  $80 \pm 4$  В. При цьому світильники повинні підключатися паралельно. Випробування макета світильника показали, що для заміни двох люмінесцентних ламп потужністю 40 Вт кожна, достатньо 20–24 одноватних світлодіодів. При цьому сучасні світлодіоди серії Xlamp фірми Cree забезпечать сумарний світловий потік 2400–2500 лм при номінальному струмі через них 0,35 А. При такому струмі пряме падіння напруги на одному діоді складе 3 В, а загальне падіння напруги на 24 сполучених послідовно світлодіодах – 72 В. Найпростішим варіантом було б живлення світлодіодів від лінійного стабілізатора струму, виконаного на інтегральному «Lowdrop», регульованому лінійному стабілізаторі напруги. Проте використання

такого стабілізатора струму викликає великі втрати потужності за рахунок низького, порядку 30–50%, коефіцієнта корисної дії останнього.

Перевагу у цьому випадку має застосування імпульсного перетворювача напруги з ШІМ регулюванням. ККД такого перетворювача може досягати 80-90%. У даний час провідні фірми-виробники електронних компонентів випускають велику номенклатуру мікросхем для побудови таких перетворювачів. Серед усіх цих мікросхем виділяється група спеціалізованих компонентів, призначених для побудови перетворювачів для живлення світлодіодів зі стабільним струмом на виході. Багато цих мікросхем мають входи для управління яскравістю світлодіодів, зміною рівня постійної напруги на них або ШІМ сигналом.

В ідеалі мікросхема для побудови джерела живлення світильників для вагонів метрополітену повинна мати такі характеристики:

- широкий, до 100–120 В, діапазон вхідної напруги;
- можливість установки будь-якої напруги в межах половини вхідної, вихідної напруги;
- можливість установки і підтримки номінального струму для світлодіодів різних типів і виробників;
- можливість управління яскравістю (DIMMING) світлодіодів, як аналоговим, так і ШІМ сигналом;
- доступність в Україні при хорошому співвідношенні ціна/якість.

Перерахованим вище вимогам задовольняє лише одна з доступних на ринку України мікросхем – HV9910В фірми Supertex [3].

Мікросхема HV9910В призначена для побудови високоефективних, з ККД більше 90%, джерел живлення світлодіодів з ШІМ управлінням. Застосування цієї мікросхеми дозволяє проектувати AC/DC і DC/DC перетворювачі в діапазоні живлячої напруги від 8 до 450 В. HV9910В управляє зовнішнім транзистором MOSFET з фіксованою частотою перемикання до 300 кГц. Частота перемикання задається єдиним резистором. Ланцюжок світлодіодів живиться стабільним струмом, а не напругою, що забезпечує постійний світловий потік. Вихідний струм перетворювача може програмуватися величиною від декількох мА до 1 А.

Внутрішній стабілізатор живлення HV9910В добре ізольований від решти схеми, що дозволяє витримувати сплески вхідної напруги аж до 450 В. Вихідний струм перетворювача може задаватися від нуля до максимального значення зміною величини напруги на аналоговому вході «dimming» мікросхеми. Мікросхема має другий вхід зміни яскравості світлодіодів у діапазоні 0-100% подачею низькочастотного, приблизно декілька кілогерц, ШІМ сигналу.

Мікросхема HV9910В, залежно від вхідної напруги, може жити стабільним струмом від одного до сотні світлодіодів. При цьому необхідно дотримуватися умови, згідно з якою максимальна вихідна напруга  $U_{\text{вих. max}}$  не повинна перевищувати половини мінімальної вхідної напруги  $U_{\text{вх. min}}$ . Таким чином, кількість світлодіодів у послідовному ланцюзі не може перевищувати 12 штук ( $U_{\text{вих. max}} = 12 \cdot 3 = 36 \text{ В} < 76/2 = 38 \text{ В}$ ).

Перераховані вище особливості HV9910В дозволяють використовувати її для створення самих різних джерел живлення, зокрема:

- AC/DC або DC/DC перетворювачів для живлення світлодіодів стабільним струмом;
- джерел постійного струму загального застосування;
- пристроїв для зарядки акумуляторів і т.п.

Базова схема перетворювача для живлення світлодіодів стабільним струмом показана на рис. 1.

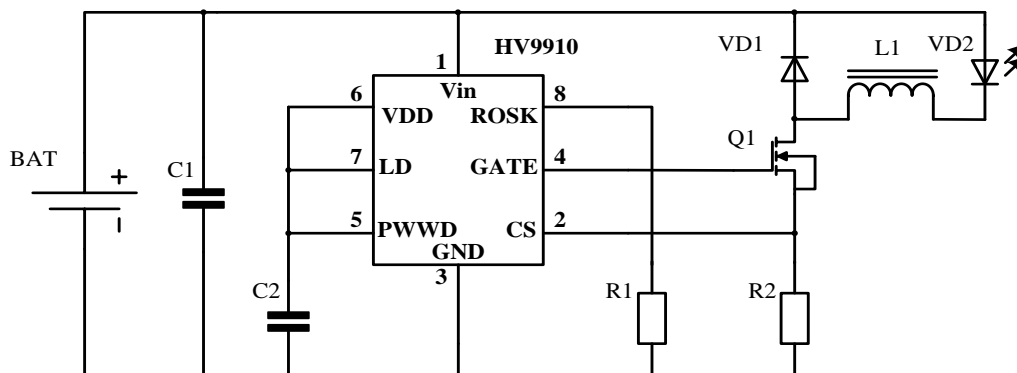


Рис. 1. Базова схема перетворювача для живлення світлодіодів

Резистор R1 задає частоту перемикання перетворювача, а R2 є датчиком струму через світлодіоди. Виконаємо розрахунок основних елементів джерела живлення. Похідні дані для розрахунку зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Похідні дані для розрахунку

№ п/п	Найменування параметра	Значення	Одиниця вимірювання
1	Вхідна напруга мінімальна, $U_{\text{вх. min}}^*$	76	В
2	Вхідна напруга номінальна, $U_{\text{вх. ном}}^*$	80	В
3	Вхідна напруга максимальна, $U_{\text{вх. max}}^*$	84	В
4	Вихідна напруга мінімальна, $U_{\text{вих. min}}^{**}$	30	В
5	Вихідна напруга номінальна, $U_{\text{вих. ном}}^{**}$	33	В
6	Вихідна напруга максимальна, $U_{\text{вих. max}}^{**}$	36	В
7	Номінальний струм через світлодіоди, $I_{\text{вих.}}$	0,35	А
8	Частота перемикання середня, $F_{\text{пер.}}$	100	кГц
9	Передбачуваний ККД	85	%

\* – діапазон вхідної напруги визначається Технічним завданням «Розробка енергозберігаючих освітлювальних світлодіодних модулів та блоків живлення до них для салонного освітлення вагонів метрополітену типів 81-717, 81-714 та їх модифікацій».

\*\* – діапазон вихідної напруги визначається кількістю світлодіодів у послідовному ланцюзі: 30 В – 10 світлодіодів; 33 В – 11 світлодіодів; 36 В – 12 світлодіодів.

#### ЕТАП 1: Вибір номінальної частоти перемикання

Хоча частота перемикання перетворювача змінюється залежно від вхідної/вихідної напруги, номінальна частота перемикання може бути вибрана і встановлена. Велика частота перетворення типова для малих величин індуктивностей  $L1$ , але при цьому збільшуються і втрати у схемі. Типовою частотою перемикання, яка рекомендується виробником мікросхем, є  $F_{\text{пер.}} = 100$  кГц; при цьому період коливань складе

$$T_{\text{пер.ном.}} = \frac{1}{F_{\text{пер.ном.}}} = 10 \text{ мс} . \quad (1)$$

#### ЕТАП 2: Розрахунок часу виключення і величини резистора R1

Час, протягом якого ключ Q1 закритий (off – time), може бути обчислено за формулою

$$T_{\text{закр.}} = \left(1 - \frac{U_{\text{вих.ном.}}}{U_{\text{вх.ном.}}}\right) \cdot T_{\text{пер.ном.}} \quad (2)$$

Час  $T_{\text{пер.}}$  встановлюється резистором  $R1$ , величина якого може бути отримана з такого виразу:

$$R1 = T_{\text{закр.}} \cdot 25 - 22 \quad (3)$$

У нашому випадку  $T_{\text{закр.}} = 5,875$  мс,  $R1 = 124,875$  кОм, а робочий цикл (період часу, протягом якого транзистор  $Q1$  відкритий) складає 41,25%.

ЕТАП 3: Розрахунок індуктивності дроселя  $L1$

Величина індуктивності  $L1$  залежить від необхідного розмаху пульсацій вихідного струму перетворювача. Зазвичай допускається 30% розмахів пульсацій вихідного струму. У цьому випадку величина індуктивності  $L1$  буде

$$L1 = U_{\text{вих.ном.}} \cdot \frac{T_{\text{закр.}}}{0,3 \cdot I_{\text{вих.}}} \quad (4)$$

Максимальний струм через дросель буде дещо більшим, ніж  $1,3 \cdot I_{\text{вих.}}$ , а ефективна величина струму через дросель – нижча  $I_{\text{вих.}}$ . Для нашого випадку індуктивність дроселя складе 184,64 мс, а максимальний струм через нього 0,455 А.

ЕТАП 4: Розрахунок датчика струму – резистора  $R2$

Максимальний струм  $I_{\text{дс}}$ , що протікає через датчик струму, визначається виразом

$$I_{\text{дс}} = I_{\text{вих.}} + \frac{(U_{\text{вих.ном.}} \cdot T_{\text{закр.}})}{2L1} \quad (5)$$

Величина резистора  $R2$  може бути обчислена як

$$R2 = \frac{0,25}{I_{\text{дс}}} \quad (6)$$

якщо використовується внутрішня опорна напруга мікросхеми, що складає 0,25 В на виведенні LD.

Потужність  $P_{\text{роз.}}$ , що розсіюється резистором  $R2$ , може бути обчислена з виразу

$$P_{\text{роз.}} = (I_{\text{вих.}})I \cdot \left(\frac{U_{\text{вих.макс.}}}{U_{\text{вх.мін.}}}\right) \cdot R2 \quad (7)$$

Для нашого випадку  $I_{\text{дс}} = 0,4027$  А,  $R2 = 0,62$  кОм,  $P_{\text{роз.}} = 0,036$  Вт.

ЕТАП 5: Вибір MOSFET транзистора Q1 і діода VD1

Максимальна напруга  $U_{\text{тр.}}$ , на яку повинен бути розрахований транзистор, залежить від максимальної вхідної напруги  $U_{\text{вх.макс.}}$ . Вибираючи 50-процентний запас по напрузі, отримуємо

$$U_{\text{тр.}} = 1,5 \cdot U_{\text{вх.макс.}} \quad (8)$$

Максимальне середнє значення струму через транзистор складе

$$I_{\text{тр.}} = I_{\text{вих.}} \cdot \left(\frac{U_{\text{вих.макс.}}}{U_{\text{вх.мін.}}}\right) \quad (9)$$

У нашому випадку максимальна напруга, яка прикладається до транзистора,  $U_{тр.} = 126 В$ , а середнє значення струму через нього  $I_{тр.} = 0,241 А$ .

При виборі транзистора слід керуватися тим, що він повинен мати великі, в порівнянні з розрахунковими, максимальні напругу та струм і при цьому мінімальний опір витік – стік  $R_{вс}$ . Останній чинник впливає на величину втрат у транзисторі. Велике значення має також конструкція (тип корпусу транзистора).

Вибираємо транзистор IRF7450 в корпусі SO-8, що має такі параметри:

$$U_{\max} = 200 В, I_{\max} = 2 А, R_{вс} = 130 мОм.$$

Максимальна напруга, яка прикладається до діода, така ж, як і на транзисторі:

$$U_{д} = U_{тр.} = 126 В. \quad (10)$$

А максимальний струм через діод складе

$$I_{д} = I_{вих.} \cdot \left( 1 - \frac{U_{вих.ном.}}{U_{вх.мак.}} \right) = 0,475 А. \quad (11)$$

Для нашого проекту понад усе підходить діод Шотки з  $U_{д} = 200 В$  і  $I_{д} = 1 А$ .

ЕТАП 6: Аналіз варіацій частоти перемикання

Два крайні (мінімальне і максимальне) значення частоти перемикання можуть бути обчислені з виразів:

$$F_{пер.мин} = \frac{1}{T_{пер.мак.}} = \frac{\left( 1 - \frac{U_{вих.мак.}}{U_{вх.мин.}} \right)}{T_{закр.}}, \quad (12)$$

$$F_{пер.мак.} = \frac{1}{T_{пер.мин.}} = \frac{\left( 1 - \frac{U_{вих.мин.}}{U_{вх.мак.}} \right)}{T_{закр.}}. \quad (13)$$

У нашому проекті частота перемикання змінюється від  $F_{пер.мин} = 89,586 кГц$  при  $U_{вих.мак.} = 36 В$  і  $U_{вх.мин.} = 76 В$  до  $F_{пер.мак.} = 109,422 кГц$  при  $U_{вих.мин.} = 30 В$  і  $U_{вх.мак.} = 84 В$ .

Оскільки в освітлювальній мережі вагона метрополітену можуть виникати короткочасні викиди напруги до 900 В, у джерелі живлення світильника потрібно передбачити ланцюги для захисту від даних викидів. Для цього паралельно вхідним клемам джерела живлення включені оксидноцинковий варистор та TVS-діод (супресор).

При виникненні імпульсу напруги варистор через нелінійність своєї характеристики різко зменшує свій опір до доль Ома і шунтує навантаження, захищаючи його та розсіюючи у вигляді тепла енергію, яку поглинає. В цьому випадку через варистор короткочасно може протікати струм, що досягає декількох тисяч ампер. Оскільки варистор практично безінерційний, то після гасіння імпульсу напруги він знов набуває дуже великого опору. Таким чином, включення варистора паралельно до входу напруги живлення перетворювача не впливає на його роботу в нормальних умовах, але «зрізає» імпульси небезпечної напруги.

Напівпровідникові TVS-діоди – напівпровідникові прилади з різко вираженою нелінійною вольт-амперною характеристикою, що пригнічують імпульсні електричні перенапруження, амплітуда яких перевищує напругу лавинного пробоя діода. У нормальному робочому режимі TVS-діод повинен бути «невидимий», тобто не впливати на роботу ланцю-

га, який захищає, до моменту виникнення імпульсу перенапруження. Електричні характеристики TVS-діода не повинні впливати на нормальне функціонування ланцюга.

Під час дії імпульсу перенапруження TVS-діод обмежує викид напруги до безпечного, тоді як небезпечний струм протікає через діод на землю, обминаючи ланцюг, який він захищає. Повна схема джерела живлення представлена на рис. 2.

На наведеній схемі елементи F1 (варистор), VD1 (TVS діод) та електrolітичні конденсатори C1, C2 являють собою вхідний фільтр, який захищає джерело живлення від викидів напруги та інших перешкод. Потенціометром R1 виставляють максимальний струм через паралельно включені ланцюги послідовно до з'єднаних світлодіодів.

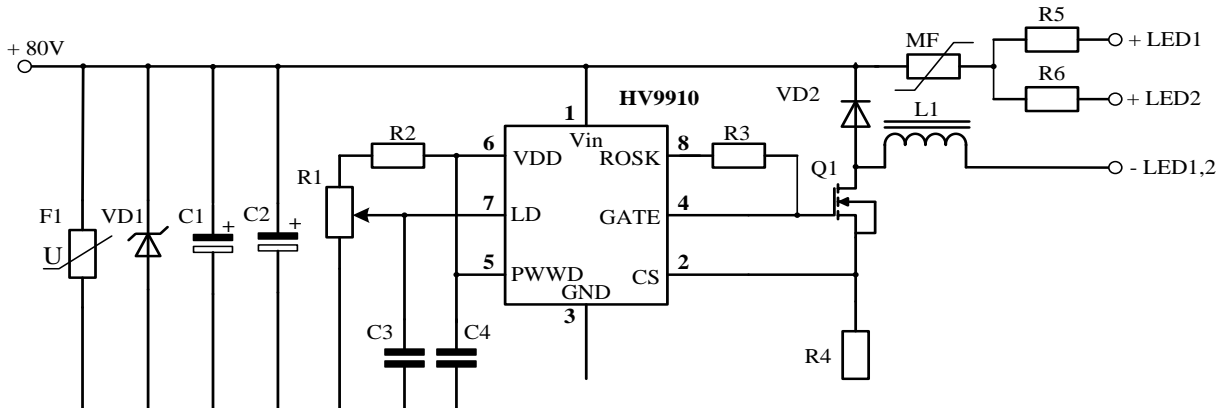


Рис. 2. Повна схема джерела живлення

Основні технічні характеристики джерела живлення для світильників салонного освітлення вагонів метрополітену серій 81-714, 81-717 представлені у табл. 2.

Таблиця 2. Основні технічні характеристики джерела живлення для світильників салонного освітлення вагонів метрополітену серій 81-714, 81-717

ВИХІД	Максимальний вихідний струм, А	0,8
	Номінальний вихідний струм, А	0,7
	Діапазон регулювання струму навантаження, %	0–100
	Вихідна потужність, Вт	26
	Похибка підтримання струму навантаження, %	±1
	Діапазон регулювання вихідної напруги, В	24–36
	Час встановлення вихідного струму, мс	300
ВХІД	Діапазон вхідної напруги постійного струму, в якому повністю забезпечуються вихідні параметри, В	Від 60 до 90
	Коефіцієнт корисної дії, типовий, %	90
	Струм, який споживається при повному навантаженні та напрузі живлення 80 В, типовий, А	0,3
	Мінімальна вхідна напруга, при якій заявлені параметри зберігаються на рівні 75% від номінальних, В	50
ЗАХИСТ НА ВХОДІ	Від викидів напруги	Зберігає повну працездатність при викидах напруги до 1200 В на протязі 10 мс
ЗАХИСТ НА ВИХОДІ	Від перевантаження	110–135% від максимального току, споживаного світильником
	Від короткого замикання на виході	Автоматичне повернення у робочий режим після усунення причини

Продовж. табл. 2

УМОВИ ЕКСПЛУ- АТАЦІЇ	Температура оточуючого середовища, °С	Від мінус 20 до плюс 60
	Вологість, %	20–90
	Температура зберігання при вологості 10–95%, °С	Від мінус 40 до плюс 85
	Вібрації	10–500 Гц, 2g, 10хв/1 цикл
ЗАГАЛЬНІ	Розміри (довжина x ширина x висота), мм	95 x 60 x 28 (170 x 60 x 30 з проміжною платою)
	Вага, кг	0,25

На відміну від базової схеми вивід 8 мікросхеми підключений через резистор R3 до затвору транзистора Q1, а не до мінусової шини. Таке підключення переводить мікросхему у режим роботи зі змінною частотою та постійним часом виключення («constantoff»). У цьому режимі мікросхема має дещо більший ККД.

Резистор R4 є датчиком струму через світлодіоди, а через вирівнюючі резистори R5 та R6 до джерела живлення підключаються ланцюги світлодіодів.

Схема стійка до короткого замикання на виході, але для підвищення надійності в неї введений самовідновлювальний запобіжник MF. Він спрацьовує, якщо струм через дві паралельно включені гілки світлодіодів перевищить 1,1 А. Після усунення причини короткого замикання схема автоматично повертається у робочий режим.

Джерело живлення змонтовано на друкованій платі (рис. 3), яка розміщена в корпусі (рис. 4).



Рис. 3. Джерело живлення на друкованій платі



Рис. 4. Друкована плата в корпусі

#### 4. Вибір структурної схеми системи освітлення вагонів метро

Розглянемо загальні вимоги до системи світлодіодного освітлення. Для того, щоб система світлодіодного освітлення могла реалізувати всі необхідні режими штучного освітлення, вона повинна забезпечувати:

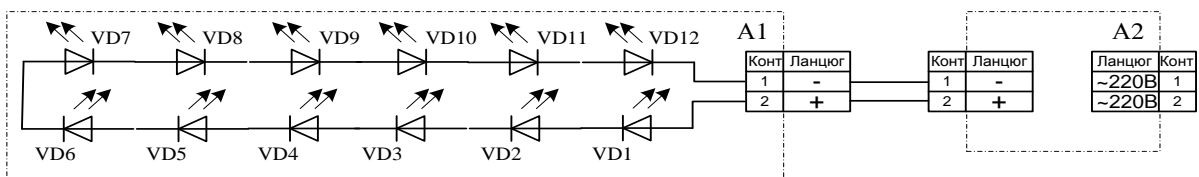
- світловий потік, достатній для створення на рівні підлоги нормованих для даного класу приміщень освітлювальних умов;
- необхідну діаграму спрямованості (зону освітлення) освітлювальних приладів при їх мінімальній кількості для заданих розмірів приміщення;
- мале, у порівнянні з традиційними освітлювальними приладами, енергоспоживання при одночасному виконанні перших двох вимог;



- можливість, при необхідності, управління яскравістю освітлювальних пристроїв;
- простоту монтажу і обслуговування освітлювальних пристроїв;
- можливість використання проводки, що існує на об'єкті, для живлення освітлювальних пристроїв.

Кожна система світлодіодного освітлення містить у собі джерела світла (світлодіоди), розміщені у відповідному конструктиві, джерела живлення, які можуть бути розміщені у тому ж конструктиві або окремо, прилади управління, прилади комутації та з'єднувальні дроти. Такі системи, в залежності від призначення, можуть живитися від мережі постійного або змінного струму різної напруги. Відповідно, такі системи мають різні структурні схеми [4].

Найпростішою структурою є одиночний світлодіодний світильник з вбудованим джерелом живлення (рис. 5).

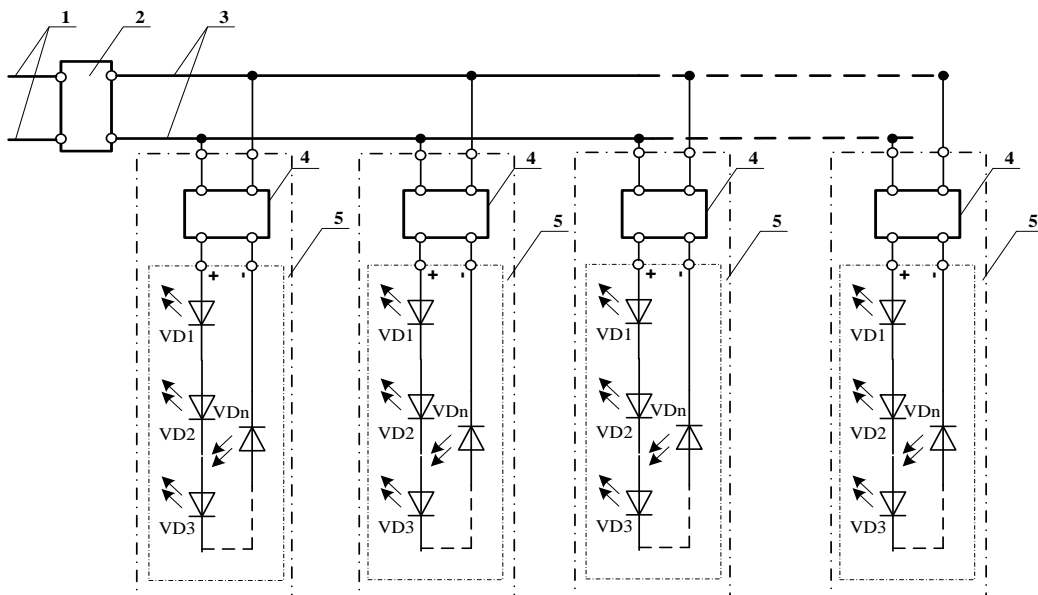


A1 – модуль світлодіодний;

A2 – AC/DC перетворювач в режимі «стабілізований струм».

Рис. 5. Світлодіодний світильник з вбудованим джерелом живлення

На рисунку показаний перетворювач AC/DC, який працює в режимі «стабілізований струм», але може бути використаний і перетворювач DC/DC. Потужність і вихідна напруга перетворювача вибираються відповідно до кількості світлодіодів у модулі. Перетворювач не має входів для управління струмом через світлодіоди. На основі цієї структури легко створюються системи освітлення з індивідуальним живленням (рис. 6).



1 – мережа змінного або постійного струму;

2 – перетворювач AC/DC або DC/DC в режимі «стабілізована напруга»;

3 – мережа стабілізованої постійної напруги;

4 – стабілізатор струму;

5 – світильники.

Рис. 6. Система освітлення з індивідуальним живленням

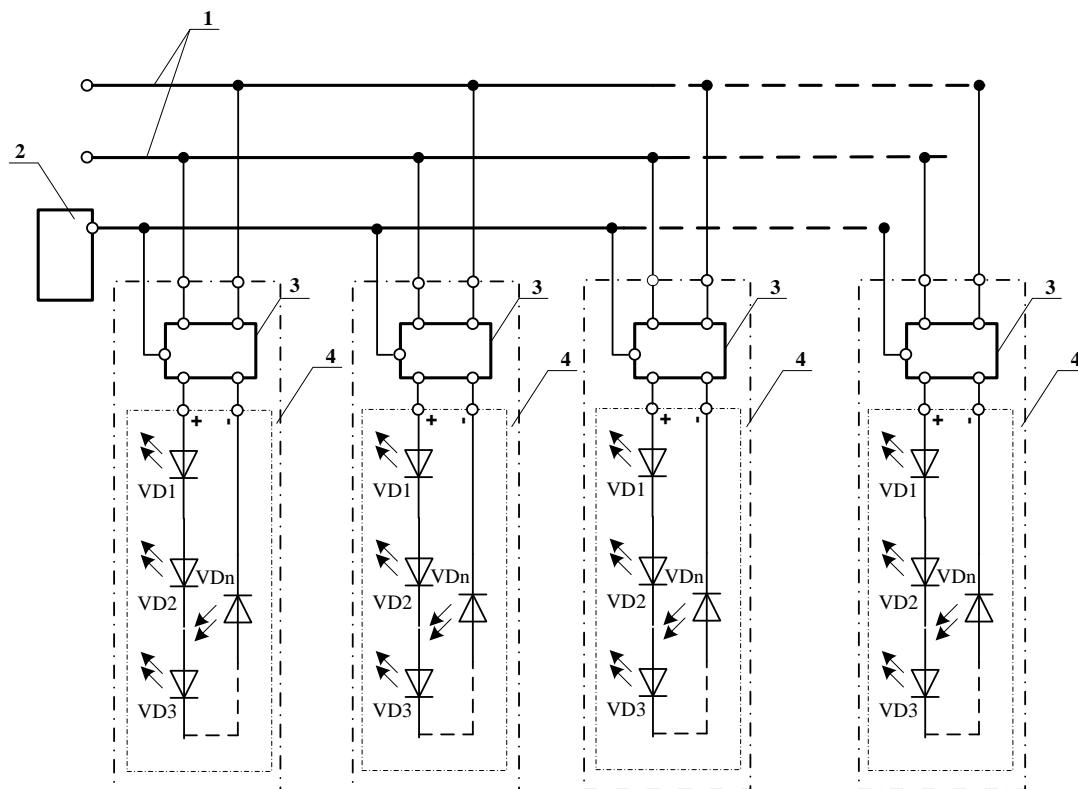
Переваги такої структури в тому, що окремі світильники встановлюються на місця світильників з традиційними джерелами світла і освітлювальна мережа не потребує ніяких доробок.

Представлені вище системи світлодіодного освітлення не дозволяють змінювати вручну чи автоматично освітленість приміщень, які вони освітлюють.

Структура, показана на рис. 7, доповнена пристроєм керування, що дозволяє в широкій межі змінювати яскравість світильників, які входять в систему. Режими штучного освітлення можуть змінюватись автоматично залежно від астрономічного часу та пори року. Пристрій керування освітленням може бути електромеханічним, але більшу гнучкість забезпечують програмовані контролери.

Система з керуванням освітленістю в порівнянні з більш простими системами, дорожча як за рахунок вартості джерел живлення, так і вартості монтажу й обслуговування.

Вартість джерел живлення, які мають входи для «dimming», на 15-20% більше, ніж у звичайних, а вартість монтажних робіт збільшується за рахунок необхідності прокласти до кожного світильника лінію для ШІМ сигналу керування. Крім того, збільшення кількості компонентів, що входять до складу системи, знижує її надійність та збільшує експлуатаційні затрати.



- 1 – мережа змінного або постійного струму;
- 2 – пристрій керування;
- 3 – перетворювач AC/DC або DC/DC в режимі «стабілізований струм»;
- 4 – світильники.

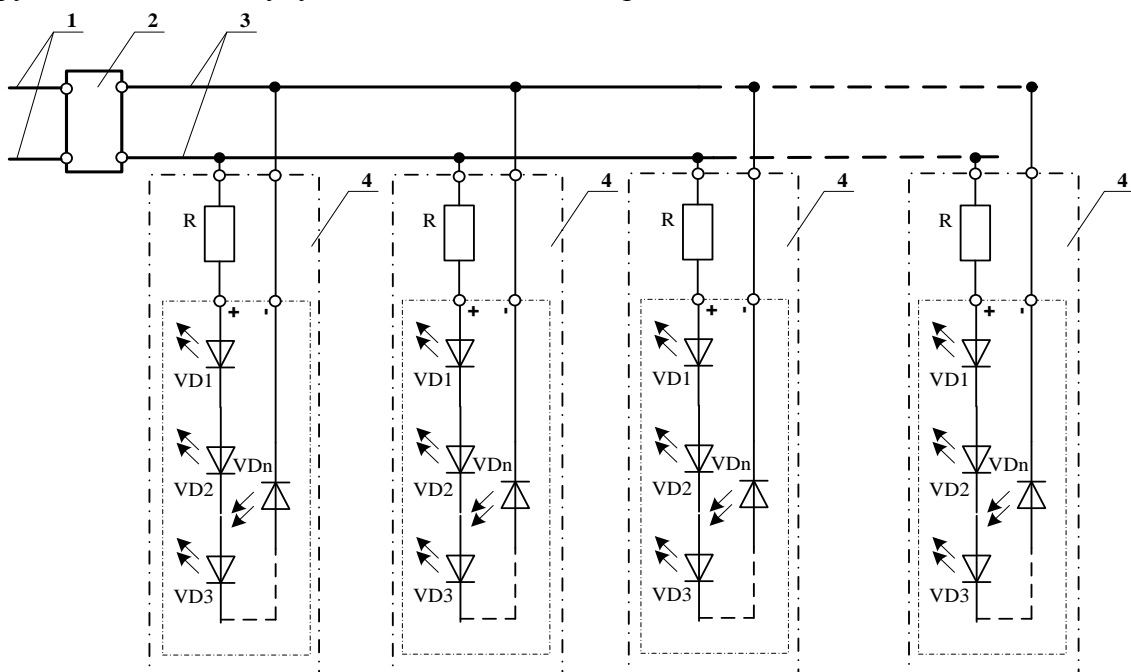
Рис. 7. Структура, що дозволяє змінювати яскравість світильників

Вище були розглянуті системи світлодіодного освітлення з індивідуальним живленням кожного світильника та використанням перетворювачів у режимі «стабілізований струм».

Однак вибір перетворювачів з режимом «стабілізований струм» відповідної потужності обмежений, у той час, як вибір перетворювачів з режимом «стабілізована напруга» набагато більший, а їх потужність може досягати 500 Вт і більше. При використанні таких перетворювачів системи світлодіодного освітлення мають групове живлення.

Завданням AC/DC або DC/DC перетворювача є формування на своєму виході стабілізованої напруги такого рівня, який прийнятний для світлодіодів. Напруга на виході формується з високої напруги освітлювальної мережі або іншого первинного джерела живлення.

Проста і відносно дешева структура системи світлодіодного освітлення показана на рис. 8. У цій схемі послідовно з ланцюгом світлодіодів у кожному світильнику включений резистор R, що обмежує струм через світлодіоди, не даючи останнім виходити з ладу при аварійному підвищенні напруги на виході перетворювача. Використання обмежуючих резисторів веде до зниження ККД системи за рахунок того, що падіння напруги на них перетворюється на тепло. Крім того, якщо перетворювач має низький коефіцієнт стабілізації напруги, світильники будуть змінювати свою яскравість.

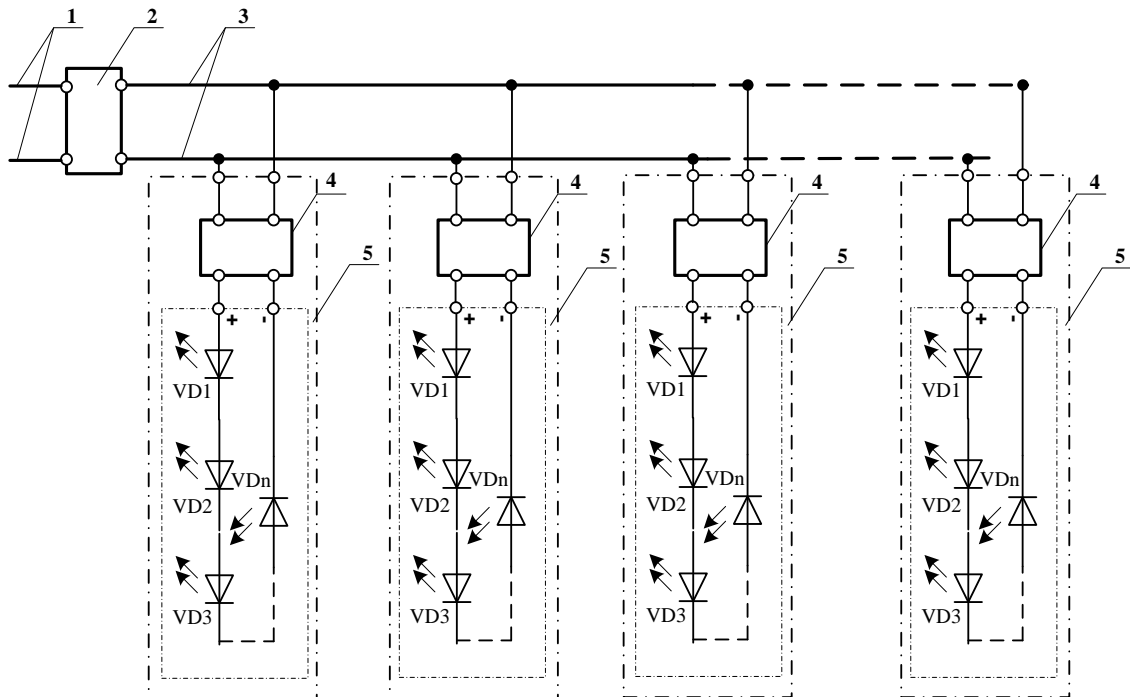


- 1 – мережа змінного або постійного струму;
- 2 – перетворювач AC/DC або DC/DC в режимі «стабілізована напруга»;
- 3 – мережа стабілізованої постійної напруги;
- 4 – світильники.

Рис. 8. Проста і відносно дешева структура системи світлодіодного освітлення

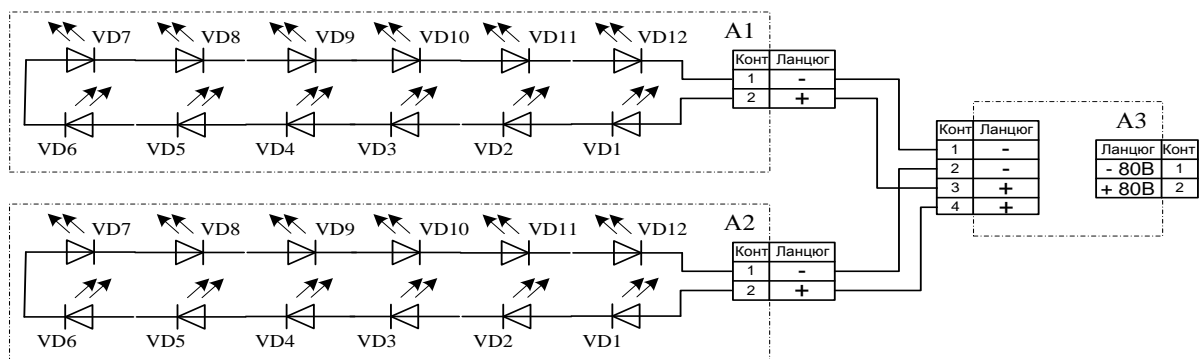
Замість резисторів можна використати інтегральні аналогові регульовані стабілізатори напруги, які включаються за схемою стабілізатора струму. В цьому випадку вони будуть підтримувати стабільний струм через світлодіоди, незважаючи на зміну напруги на вході, і світильники не будуть змінювати яскравість. Але на таких стабілізаторах при нормальній роботі повинно падати не менше 3–6 В, які також перетворюються на тепло. З урахуванням того, що ряд вихідних напруг перетворювачів стандартизований, напруга на вході стабілізатора струму може бути більша, ніж потрібна йому для нормальної роботи, тобто більша, ніж сума падінь напруги на ланцюгу світлодіодів та самому стабілізаторі. У цьому випадку вся надлишкова напруга перетвориться на тепло, що може визвати необхідність застосування тепловідводу для самого стабілізатора.

Більш енергоекономічним, але й більш дорогим, є використання у кожному світильнику ШІМ перетворювачів постійного струму в постійний, які працюють в режимі «стабілізований струм». Така структура показана на рис. 9.



- 1 – мережа змінного або постійного струму;
- 2 – перетворювач AC/DC або DC/DC в режимі «стабілізована напруга»;
- 3 – мережа стабілізованої постійної напруги;
- 4 – стабілізатор струму;
- 5 – світильники.

Рис. 9. Структура з інтегральними ШІМ стабілізаторами струму



- A1, A2 – модулі світлодіодні лінійні;
- A3 – DC/DC перетворювач в режимі «стабілізований струм».

Рис. 10. Система салонного освітлення вагонів метрополітену

Такі інтегральні ШІМ стабілізатори струму випускаються різними зарубіжними фірмами і мають велику номенклатуру входних і вихідних напруг та вихідного струму від 0,35 А до 1 А. Таким чином, послідовні ланки світлодіодів можуть підключатись до них паралельно.

За результатами аналізу наведених вище структурних схем систем світлодіодного освітлення для системи салонного освітлення вагонів метрополітену вибрана структура, зображена на рис. 10, яка є різновидом структури системи освітлення з індивідуальним живленням (рис. 6).

Відмінність цієї структури від системи освітлення з індивідуальним живленням (рис. 6) полягає в тому, що перетворювач АЗ має ручне регулювання струму через гілки світлодіодів А1 та А2. Це дозволяє в широких межах регулювати яскравість кожного з десяти світильників, забезпечуючи потрібну освітленість у заданій площині вагона. Усі світильники вагона об'єднані у дві групи (7 штук основного освітлення та 3 штуки аварійного освітлення), в межах яких вони включені паралельно. Всі світильники живляться від бортової мережі вагона напругою постійного струму +80 В.

## 5. Конструктивні рішення світлодіодних освітлювальних пристроїв

Для виконання вимог до світлового потоку освітлювального пристрою в ньому треба використовувати необхідну кількість світлодіодів зі світловим потоком не менше 110–120 лм. Також треба враховувати, що плафон світильника може затримувати 35–40% світлового потоку.

Для виконання вимог до зони освітлення при необхідності використовують з кожним світлодіодом оптичну систему (коліматор) з необхідним кутом розкриття і розміщують світлодіоди на достатній відстані один від одного.

Вибрана для використання в конкретному проекті освітлювальна арматура повинна забезпечити можливість установки світлодіодів на тепловідвід відповідної площі і, бажано, монтаж джерела живлення, а також, при необхідності, датчика руху або сутінкового реле.

Особливу групу складають світильники спеціального призначення, в тому числі для освітлення салону вагонів метрополітену.

Згідно з Технічним завданням на дослідно-конструкторську роботу «Розробка енергозберігаючих світлодіодних модулів та блоків живлення до них для салонного освітлення вагонів метро моделей 81-717, 81-714», світлодіодні модулі конструктивно повинні бути виконані з використанням існуючих плафонів салонного освітлення вагонів метрополітену моделей 81-717, 81-714 з мінімальними переробками. Кріплення світлодіодного модуля повинне бути «нестандартним» (не пристосованим для використання в побуті), важкознімним, ремонтпридатним.

На рис. 11 представлений внутрішній вигляд світильника для салонного освітлення вагонів метрополітену серій 81-714, 81-717, розробленого у процесі виконання проекту.



Рис. 11. Внутрішній вигляд світильника для салонного освітлення вагонів метрополітену

Як видно на рис. 11, з корпусу видалені люмінесцентні лампи, всі компоненти їх живлення і з'єднувальні дроти. Замість люмінесцентних ламп встановлені два тепловідводи, виконані з алюмінієвого профілю. На кожному тепловідводі встановлено по 12 потужних світлодіодів та елементи безвинтового підключення – клемники фірми WAGO. Тепловідводи кріпляться до корпусу комбінованими кутниками, одне плече яких виконане з алюмінію, а друге – із склотекстоліту.

Це потрібно для того, щоб гальванічно розв'язати тепловідводи із світлодіодами від «землі» вагону. На дні корпусу розміщене джерело живлення, яке працює в режимі «стабілізований струм». Конструкція розрахована

так, що всі її елементи кріпляться у корпусі без будь-яких доробок останнього. При монтажі світлодіодного світильника немає потреби знімати корпус з місця його установки. Ці особливості розробленої нами конструкції дають можливість значно зменшити час заміни люмінесцентних ламп на світлодіодні модулі.

## 6. Етапи розробки та результати впровадження

На замовлення комунального підприємства «Київський метрополітен» Інститут проблем математичних машин і систем НАН України (ІПММС НАН України) розробив енергозберігаючу світлодіодну систему салонного освітлення вагонів метро моделей 81-717, 81-714, яка складається з світлодіодних модулів світильників та блоків живлення до них.

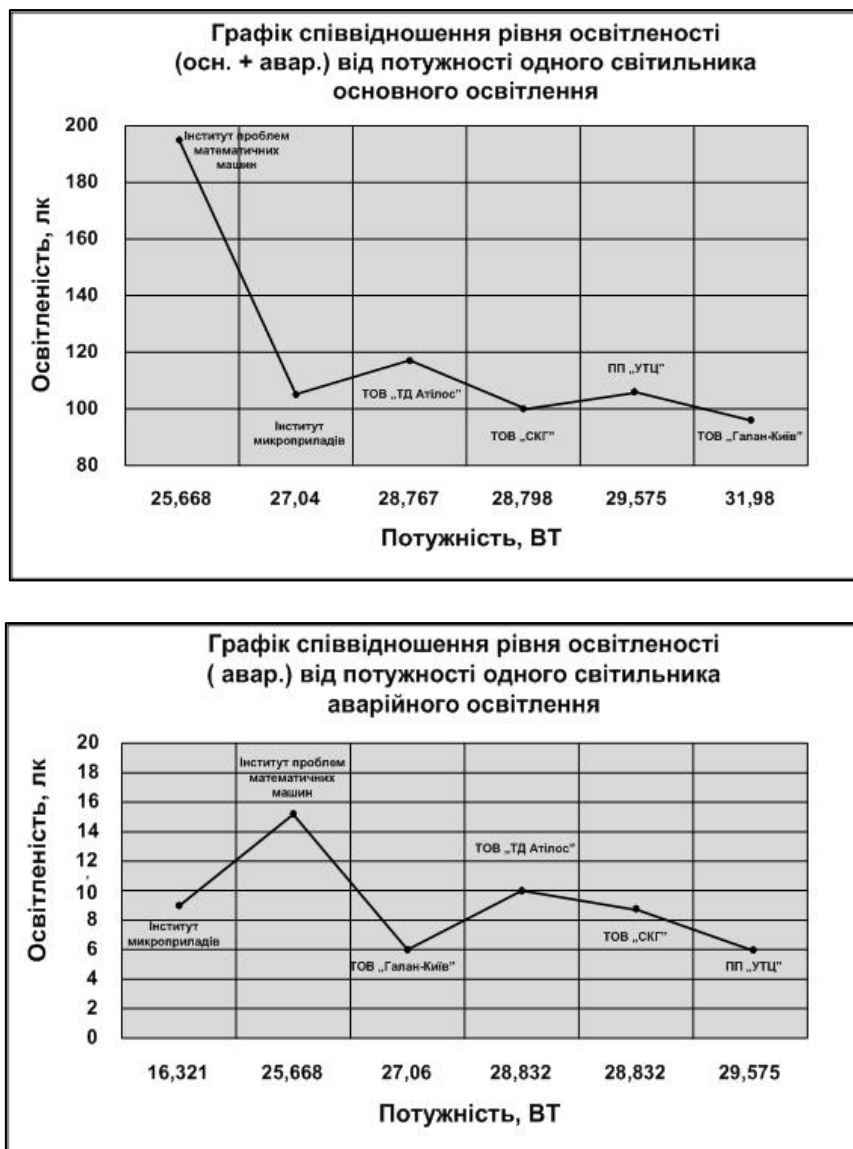


Рис. 12. Графіки результатів стаціонарних випробувань

Роботи розпочалися у березні 2010 року, коли КП «Київський метрополітен» об'явив конкурс на модернізацію систем салонного освітлення вагонів метро моделей 81-717, 81-714 та їх модифікацій для Куренівсько-Червоноармійської лінії. За технічним завданням освітлювальні світлодіодні модулі (ОСМ) повинні були замінити люмінесцентні лампи ЛБ-40 з напівпровідниковими перетворювачами живлення у світильниках салонного

освітлення. При цьому споживання електроенергії всіма світильниками салону (10 штук) не повинно було перевищувати 300Вт при напрузі живлення 80В.

У конкурсі приймали участь 6 організацій, у тому числі і ПММС. Кожен із учасників повинен був обладнати один вагон ОСМ своєю розробкою, використовуючи існуючу арматуру салонного світильника. Переобладнані вагони пускалися у дослідну експлуатацію, на протязі якої по кожному вагону періодично реєструвалися світлотехнічні, енергетичні та експлуатаційні параметри систем освітлення. Після закінчення дослідної експлуатації в депо «Оболонь» комісією з представників Київського метрополітену і учасників конкурсу були проведені стаціонарні випробування систем освітлення дослідних вагонів. Результати випробувань відображені на рис. 12 [5].

Як видно з графіків, система освітлення, розроблена та виготовлена ПММС, випереджає інші по всім показникам.

Загальний вигляд модернізованого вагону серії 81-717 з установленою в ньому системою світлодіодного освітлення розробки ПММС показаний на рис. 13.



Рис. 13. Загальний вигляд модернізованого вагону серії 81-717

У липні 2011 року КП «Київський метрополітен» об'явив відкриті торги по закупівлі енергозберігаючих світлодіодних систем салонного освітлення вагонів метро 81-714, 81-717 та їх модифікацій.

Умовами тендеру передбачалось надання учасниками висновку, що запропонована система освітлення відповідає санітарним нормам і може бути використана у вагонах метрополітену. У зв'язку з цим ІПММС НАН України спільно з Інститутом медицини праці АМН України, який має досвід досліджень світлодіодних джерел світла [6], провів дослідження та оцінку параметрів енергозберігаючих світлодіодних модулів і блоків живлення до них салонного освітлення вагонів метро (призначених для заміни люмінесцентних ламп у світильниках вагонів) на відповідність санітарним нормам України.

Дослідження проводились в електродепо «Оболонь» на діючій системі освітлення вагону метро розробки ІПММС, що складається з 10 світильників з енергозберігаючими світлодіодними модулями.

У процесі досліджень були використані така контрольно-вимірювальна апаратура і обладнання: фотометр цифровий ТЕС 0693, термометр кульовий «Тензор-41», дозиметр енергетичної освітленості «Тензор-51», пірометр МХ-2.

Результати вимірювань наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Результати вимірювань

№	Параметр вимірювання	Відстань, м	Одиниця вимірювання	Результати вимірювань					Нормовані значення
				Т.1	Т.2	Т.3	Т.4	Т.5	
1	Освітленість	На рівні очей	Лк	230	230	196	200	230	150
		Згідно з ТЗ*	Лк	150	159	138	142	159	
2	Видиме випромінювання	На рівні очей	Вт/м <sup>2</sup>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	3,0**
		Згідно з ТЗ*	Вт/м <sup>2</sup>	0,8	0,8	0,6	0,6	0,8	
3	Яскравість	На рівні очей	Кд/м <sup>2</sup>	1940	1940	1900	1900	1950	5·10 <sup>5</sup>
		Згідно з ТЗ*	Кд/м <sup>2</sup>	1070	1070	1000	1070	1070	
4	Температура на поверхні світильника	На поверхні приладу	°С	20,8-20,9	20,8-20,9	20,8-20,9	20,8-20,9	20,8-20,9	45
5	Пульсація світлового потоку	Згідно з ТЗ*	%	-	-	-	-	-	20

\* – п. 2.1.7 ТЗ. Світильники основного освітлення повинні забезпечувати освітленість салону вагонів метрополітену на рівні 0,8 м від підлоги та на відстані 0,6 м від спинки дивану 110 ± 10 Лк.

\*\* – орієнтовні рівні.

Висновки Інституту медицини праці АМН України такі: «За результатами випробувань енергозберігаючі світлодіодні модулі та блоки живлення до них салонного освітлення вагонів метро (призначених для заміни люмінесцентних ламп у світильниках салонного



освітлення вагонів метрополітену) відповідають вимогам діючого санітарного Законодавства України і можуть бути використані в заявленій сфері застосування».

У листопаді 2011 року були опубліковані результати тендеру на закупівлю ОСМ з джерелами живлення для обладнання 50 вагонів згаданих вище серій, в якому переможцем був об'явлений Інститут проблем математичних машин і систем НАН України.

На протязі чотирьох наступних місяців було виготовлено майже 1000 світлодіодних модулів та 500 джерел живлення до них. Енергозберігаючими світлодіодними системами освітлення розробки та виготовлення ІПММС переобладнані 50 вагонів Куренівсько-Червоноармійської лінії Київського метрополітену, які безвідмовно працюють по теперішній час.

Розроблена в ІПММС система світлодіодного освітлення вагонів метро серії 81-717, 81-714 в порівнянні зі стандартною системою освітлення на люмінесцентних лампах забезпечує економію електроенергії в 3 рази, збільшення освітленості вагонів більше ніж у 1,5 рази, зменшення витрат на обслуговування системи освітлення за рахунок значно більшої надійності і терміну експлуатації світлодіодних джерел світла. У відповідності з техніко-економічним обґрунтуванням, виконаним у депо «Оболонь», щорічна економія від впровадження світлодіодних світильників у вагонах метрополітену серії 81-717, 81-714 становить понад 250 тис. гривень.

Розроблені в ІПММС світлодіодні пристрої для освітлення вагонів рухомого складу залізниці, у тому числі для освітлення вагонів метрополітену, та світлодіодні світильники різного призначення захищені Патентами України [7–10].

## 7. Висновки

1. Сформульований критерій вибору світлодіодів для освітлювальних пристроїв. Згідно з цим критерієм, для реалізації даного проекту були вибрані світлодіоди фірми Cree.
2. Показано, що як джерела живлення світильників вагонів метрополітену доцільне застосування імпульсного перетворювача напруги з ШІМ регулюванням.
3. Для джерела живлення вибрана мікросхема HV9910B фірми Supertex, призначена для побудови високоефективних, з ККД більше 90%, перетворювачів для живлення світлодіодів зі стабільним струмом на виході та з ШІМ управлінням.
4. Представлена схема джерела живлення та виконаний розрахунок основних його елементів. Наведені основні технічні характеристики джерела живлення.
5. За результатами аналізу структурних схем систем світлодіодного освітлення для системи салонного освітлення вагонів метрополітену вибрана структура, яка є різновидом структури системи освітлення з індивідуальним живленням.
6. За результатами експлуатації енергозберігаючих світлодіодних систем салонного освітлення вагонів метро Куренівсько-Червоноармійської лінії Київського метрополітену, розроблених і впроваджених ІПММС, встановлено, що у порівнянні зі стандартними системами освітлення з люмінесцентними світильниками світлодіодні системи забезпечують економію електроенергії в 3 рази і збільшення освітленості більше ніж у 1,5 рази.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Сорокин В.М. Внедрение светодиодных осветительных систем в масштабах национальной экономики Украины / В.М. Сорокин // Современная светотехника. – 2012. – № 3–4. – С. 7 – 14.
2. Мельниченко А.Ф. Светодиоды Cree XLamp XB-D и XT-E – новый шаг на пути к светодиодному освещению / А.Ф. Мельниченко // Электронные компоненты и системы. – 2012. – № 1 (173). – С. 31 – 33.
3. Вовк П.С. Микросхемы драйверов светодиодов HV9910B и HV9961 производства Supertex / П.С. Вовк // Chip News Украина. – 2011. – № 3. – С. 36 – 38.

4. Корбут В.Б. Енергозберігаючі світлодіодні системи освітлення / В.Б. Корбут, М.Г. Ієвлев, В.Г. Бутко // Науково-технічна інформація. – 2013. – № 2. – С. 42 – 49.
5. Корбут В.Б. Енергозберігаючі світлодіодні системи освітлення вагонів метро / В.Б. Корбут, М.Г. Ієвлев, В.Г. Бутко // Науково-технічна інформація. – 2013. – № 4. – С. 44 – 49.
6. Исследование влияния излучения светодиодных источников света на некоторые основные системы организма / В.Г. Мартиросова, В.И. Назаренко, В.М. Сорокин [и др.] // Світло Люкс. – 2011. – № 2. – С. 36 – 43.
7. Пат. України на корисну модель № 71804. Пристрій для освітлення вагонів рухомого складу / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г. – опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.
8. Пат. України на корисну модель № 90086. Світильник світлодіодний / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г. – опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.
9. Пат. України на корисну модель № 91106. Світильник аварійного (евакуаційного) освітлення / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г. – опубл. 25.06.2014, Бюл. № 12.
10. Пат. України на винахід № 106578. Світильник аварійного (евакуаційного) освітлення / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г. – опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

*Стаття надійшла до редакції 02.05.2018*