

УДК 621.328

**В. І. Корнага**, асп.,  
**В. М. Сорокін**, докт. техн. наук,  
**О. С. Олійник**, науковий співробітник  
 Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ

**О. Д. Галинський**, заступник голови правління НАК «Укрсвітлолізинг»

## **СТВОРЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

### **Вступ**

Інтелектуальні освітлювальні системи (Smart Lighting) являються у вищій степені перспективними приладами недалекого майбутнього. Завдяки таким системам можлива реалізація автоматичного або дистанційного керування освітленістю об'єктів, спектральним складом освітлення, направленістю світлового потоку, вимкненням в залежності від зовнішніх запрограмованих дій, а також багатьох інших функцій, що задаються користувачем [1]. Також вони можуть забезпечувати спеціальне освітлення та виконувати функцію сигналізаційного освітлення. Такі системи являються гнучкими при вирішенні багатьох задач освітлення, але сьогодні є ще достатньо складними при проектуванні та реалізації, оскільки потрібно забезпечувати:

1. високу стабільність параметрів електронних схем керування;
2. високоефективне охолодження світлодіодів, що дає змогу забезпечити максимальну стабільність світлового потоку та спектральних характеристик світлодіодів;
3. плавну зміну світлового потоку, колірної температури та індексу кольоропередачі;
4. контроль освітленості та оптичних параметрів;
5. високий ККД системи;
6. можливість роботи системи як в автоматичному режимі, так і ручному;
7. великий термін служби і напрацювання на відмову;
8. можливість дистанційного керування системою.

### **Вибір типу світлодіодів як джерел світла інтелектуальних систем освітлення**

Широкі перспективи для реалізації таких «розумних» пристроїв відкриваються при використанні комбінації потужних білих (W) світлодіодів з різними колірними температурами та RGB світлодіодів з керованими енергетичними параметрами [2]. Застосування такої комбінації світлодіодів в освітлювальному пристрої дозволяє керувати освітленістю, колірною температурою випромінювання та індексом кольоропередачі. Хоча перевагою систем з двома білими світлодіодами з різними

колірними температурами являється невисока складність реалізації та відносно невисока вартість, такі системи мають обмеження в можливому діапазоні кольорних температурах, максимальне та мінімальне значення яких задаються кольорними температурами «холодного» та «теплого» світлодіода. На хроматичній діаграмі кольорів СІЕ 1931 (рис.1) зображені точки значень кольорних температур цих двох світлодіодів. Відповідно всі значення кольорних температур, які можна отримати при комбінації випромінювання холодного та теплого світлодіодів, будуть лежати на кривій Планка між цими двома точками (3000К÷5600К).

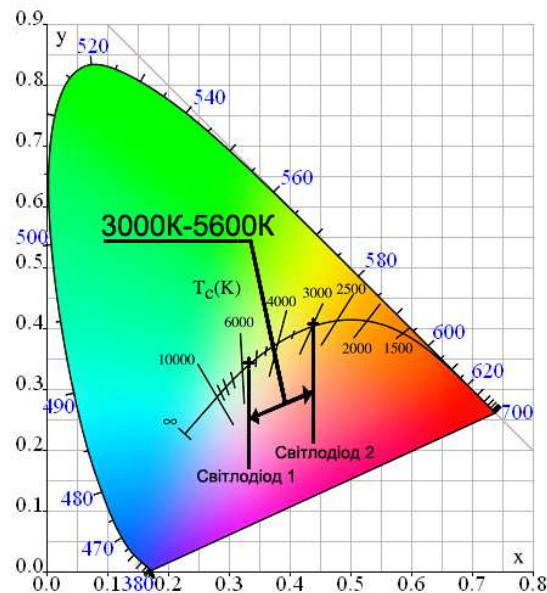


Рис. 1 - Можливий діапазон значень кольорних температур в джерелах світла на основі систем з двома білими світлодіодами

Більші можливості дають системи побудовані на основі RGB світлодіодів. Зокрема можна в широких межах змінювати кольорну температуру, індекс кольоропередачі, забезпечувати сигнальне освітлення та можливість налаштування користувачем певного відтінку світіння. Головним недоліком такої системи являється висока її вартість та складність в реалізації. Також можна вважати недоліком низький індекс кольоропередачі, оскільки відсутні певні частини спектра (рис.2). Такий недолік усувається додаванням білого світлодіода. Спектр світіння такої системи зображений на рис.3.

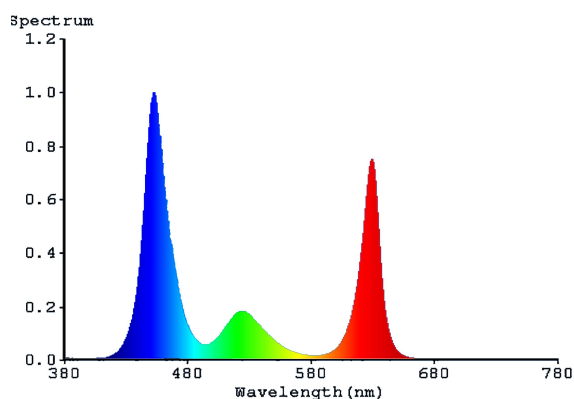


Рис. 2 - Спектр світіння освітлювальної системи, побудованої на основі RGB світлодіодів

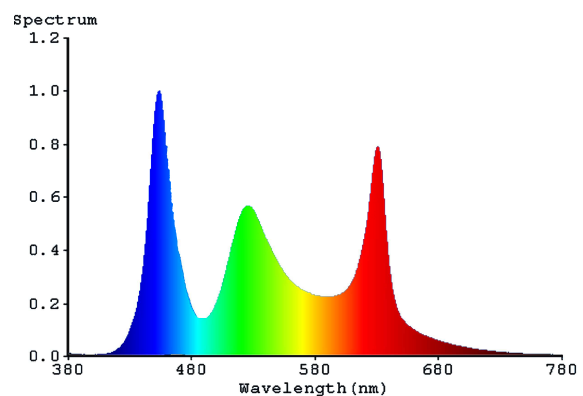


Рис. 3 - Спектр світіння освітлювальної системи, побудованої на основі RGBW світлодіодів

### Методи керування інтелектуальними системами освітлення

Інтелектуальна освітлювальна система має передбачати безперешкодне та зручне керування нею, що дає змогу її широкого розповсюдження та входження в більш складні структури, такі як «розумний дім» [3] (рис.4).

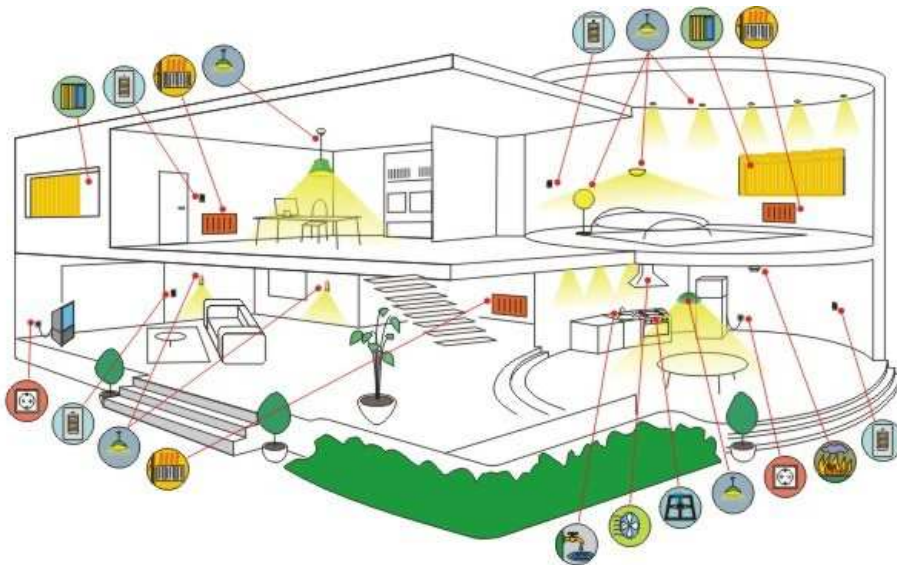


Рис. 4 - Вузли, які піддаються керуванню в системі «розумний дім»

Існують чотири методи, які забезпечують керування світлотехнічною системою, а саме передають інформацію:

- по окремим інформаційним кабельним лініям;
- за допомогою дистанційного пульта керування по інфрачервоному каналу передачі;
- через високочастотний WIFI канал [4];
- через мережу живлення ( PowerLine Communications PLC) [1,5].

Самим простим методом у реалізації та найбільш завадостійким є метод передачі інформації по окремим інформаційним кабельним лініям, але недолік даного методу полягає у необхідності прокладання цих кабелів. При великій кількості пристроїв, що потребують дистанційного керування, це приводить до додаткових витрат на складні монтажні роботи.

Керування системою по інфрачервоному каналу передачі є доволі простим у реалізації і має велику кількість напрацювань. Головним недоліком є керування на малій відстані у зоні прямої видимості. Тому такий метод використовують як додатковий або локальний, коли користувач задає параметри окремій освітлювальній системі з пульта дистанційного керування.

WiFi або бездротова локально-обчислювальна мережа розроблялася для вирішення завдання бездротового широкосмугового доступу до мереж передачі даних на високих швидкостях. Основна мета такої технології - надання мобільності користувачам з різними типами пристроїв:

- лаптопи;
- нетбуки;
- планшетні комп'ютери;
- смартфони;
- Wi-Fi радіотелефони (VoIP over Wi-Fi).

Закладений великий потенціал даної системи передачі інформації та великий діапазон IP адрес дає можливість використовувати її як один з методів керування

інтелектуальними системами освітлення. Висока перспективність таких систем полягає в можливості керування параметрами освітлювальних систем (а також інших пристроїв) в будь-якому куточку світу, якщо реалізований доступ до мережі Інтернет. Недоліком є встановлення в кожен пристрій приймача та передавача за рахунок чого збільшується вартість системи.

PowerLine Communications (PLC) - передова технологія, що дозволяє використовувати існуючі мережі змінного електричного струму в якості середовища для інформаційного обміну. Корисний сигнал для передачі цифрової інформації являє собою високочастотну модуляцію на основному сигналі - несучої 50 Гц. Широка поширеність електричних мереж, відсутність необхідності проведення дорогих робіт, пов'язаних із створенням траншей і колодязів, пробиванням стін і прокладанням кабелів, а також можливість формування симетричних каналів зв'язку стимулюють підвищений інтерес до електричних мереж як середовища передачі даних. Але при внесенні сигналів в загальну мережу живлення відбувається фактичне внесення радіозавад, тому при використанні такої системи потрібно витримувати регламент по електромагнітній сумісності.

### Створення дослідного зразка та його дослідження

Для реалізації інтелектуальної освітлювальної системи було обрано RGBW світлодіод фірми CREE XLamp MC-E Color, який зображений на рис.1.

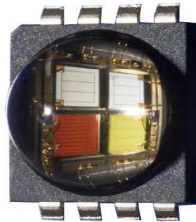


Рис. 5 - Світлодіод XLamp MC-E Color(CREE)

Для забезпечення коректного керування світлодіодом, отримання певного світлового потоку, рівномірного розподілу світла та оптимальних режимів роботи проведені комплексні дослідження RGBW світлодіода, під час яких отримано спектри випромінювання, вольт-амперні, ампер-яскравісні характеристики та залежність ефективності світлодіода від керуючого струму для всіх кристалів світлодіода (Рис.6-Рис.12).

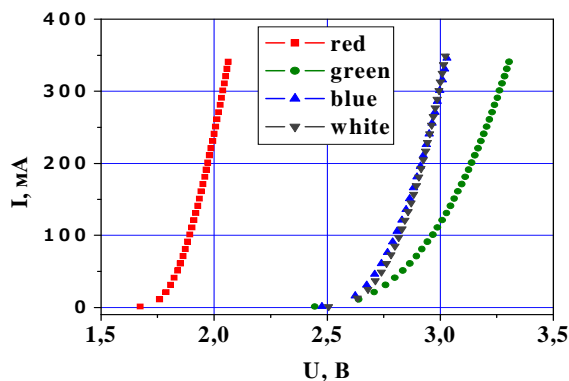


Рис. 6 - Вольт-амперна характеристика RGBW світлодіодів

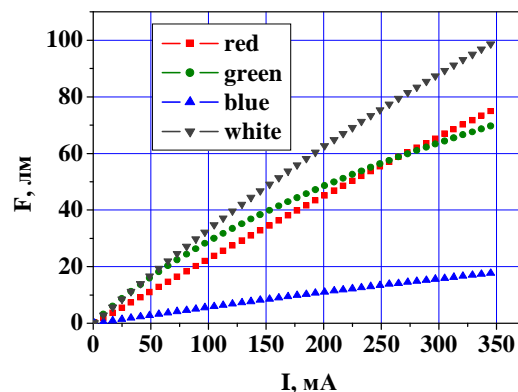


Рис. 7 - Ампер-яскравісна характеристика RGBW світлодіодів

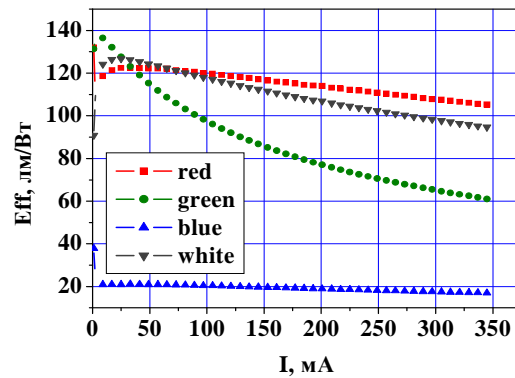


Рис. 8 - Залежність ефективності RGBW світлодіодів від струму

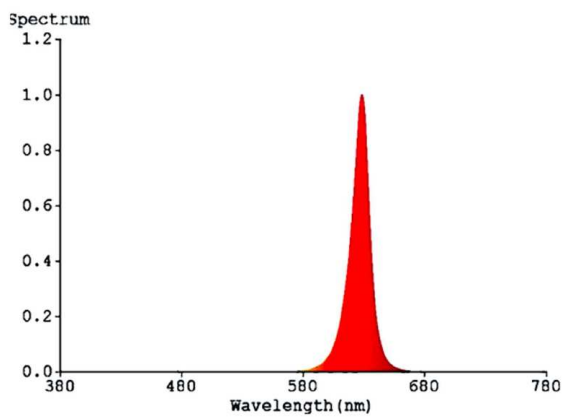


Рис. 9 - Спектр випромінювання червоного світлодіода

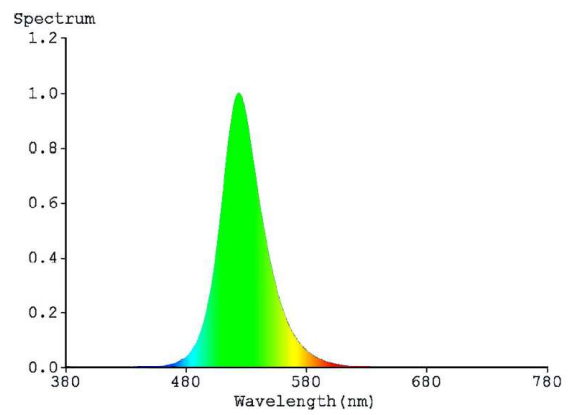


Рис. 10 - Спектр випромінювання зеленого світлодіода

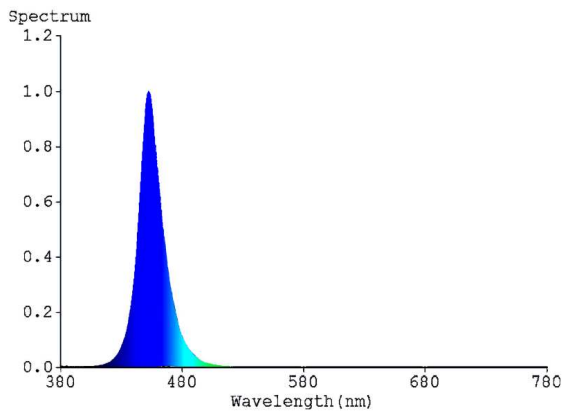


Рис.11 - Спектр випромінювання синього світлодіода

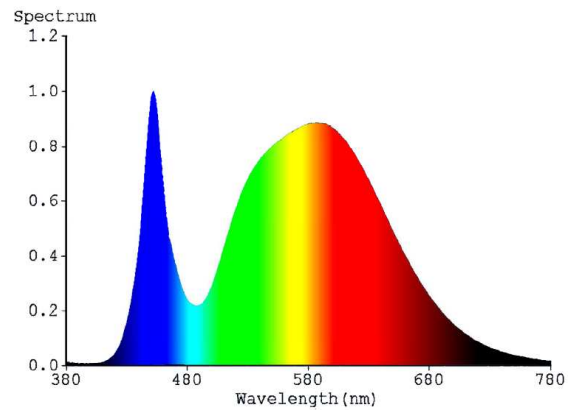


Рис.12 - Спектр випромінювання білого світлодіода

На основі отриманих результатів по вольт-амперних характеристиках було визначено параметри схем керування - максимальний струм та максимальну напругу. За результатами дослідження ампер-яскравісних характеристик, залежностей ефективності світіння від струму, спектрів випромінювання визначено необхідні параметри струму на кожен RGBW світлодіод для отримання певної колірної температури та індексу кольоропередачі.

На рис.13 зображено блок-схему інтелектуальної освітлювальної системи. З неї видно, що живлення системи забезпечується за допомогою AC/DC та додаткового

DC/DC перетворювача, що живлять мікроконтролер. Мікроконтролер є основним вузлом системи, оскільки веде моніторинг сигналів, які приходять з датчиків, схеми реального часу та пульта дистанційного керування (рис. 14). Також він здійснює задавання величини струму кожного з RGBW світлодіодів, що забезпечує певне значення світлового потоку, колірної температури та індексу кольоропередачі.

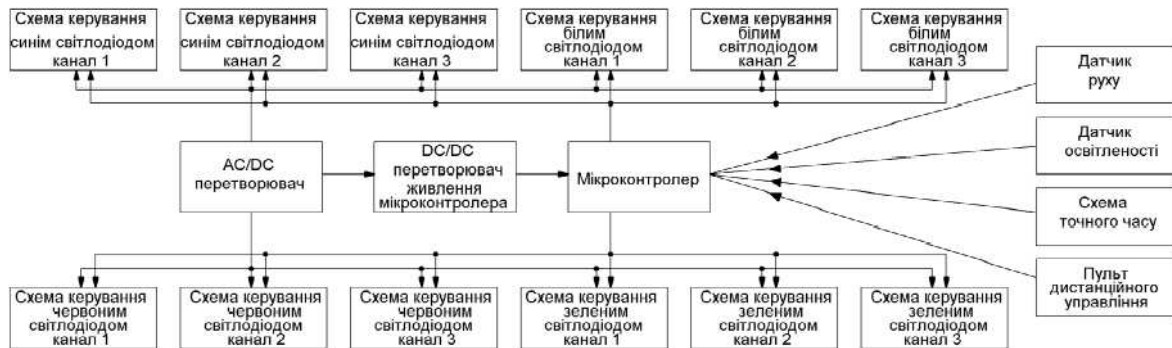


Рис. 13 - Блок-схема інтелектуальної освітлювальної системи



Рис. 14 - Пульт дистанційного керування (ПДК) інтелектуальною освітлювальною системою

За останніми дослідженнями [6] протягом доби колірна температура та освітленість повинні змінюватися, як показано на рис.15. Це підвищує продуктивність праці та стабілізує емоційний стан людини. Тому в інтелектуальній системі освітлення згідно алгоритму, представленому на рис.16, це передбачено і реалізовано в автоматичному режимі роботи. Під час вмикання інтелектуальної

освітлювальної системи проходить зчитування мікроконтролером реального часу з мікросхеми часу, яка здатна працювати автономно при вимкненні загального живлення. Згідно отриманого часу встановлюються певні рівні широтно імпульсно модульованого (ШІМ) сигналу, який подається на канали електронних схем керування і задає певну колірну температуру. Так зранку з 8:00 до 10:00 відбувається світіння з колірною температурою 6000-5000K після цього плавно змінюється до 4500K і з 12:00 до 14:00 відбувається «тепле» світіння (обідня перерва), яке змінює колірну температуру до 4000K-3000K. Після обіду потрібно збільшити колірну температуру до 6000K, що збільшить працездатність людини. До вечора колірна температура буде плавно зменшуватися і досягне 3000K, що сприяє умовам відпочинку людини.

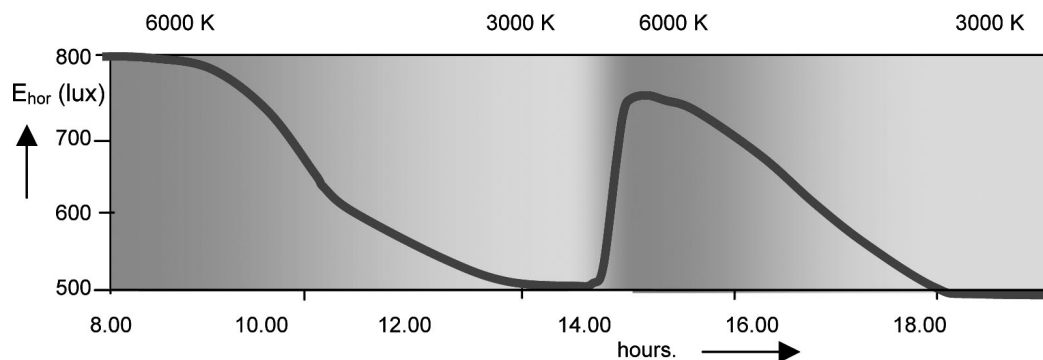


Рис. 15 - Залежність колірної температури та освітленості від часу доби



В керування яскравістю світіння можуть вноситися зміни, згідно отриманих сигналів з датчиків освітленості. Також система в автоматичному режимі передбачає ввімкнення по датчику руху. В ручному режимі роботи користувач має змогу налаштувати інтелектуальну освітлювальну систему за допомогою ПДК, з якого і задається автоматичний режим роботи. Перевагою над усіма керуючими командами мають команди з ПДК. Всі заміри з датчиків та приймання сигналів ПДК ведуться по перериванню, яке може здійснюватись в будь якій момент роботи програми.

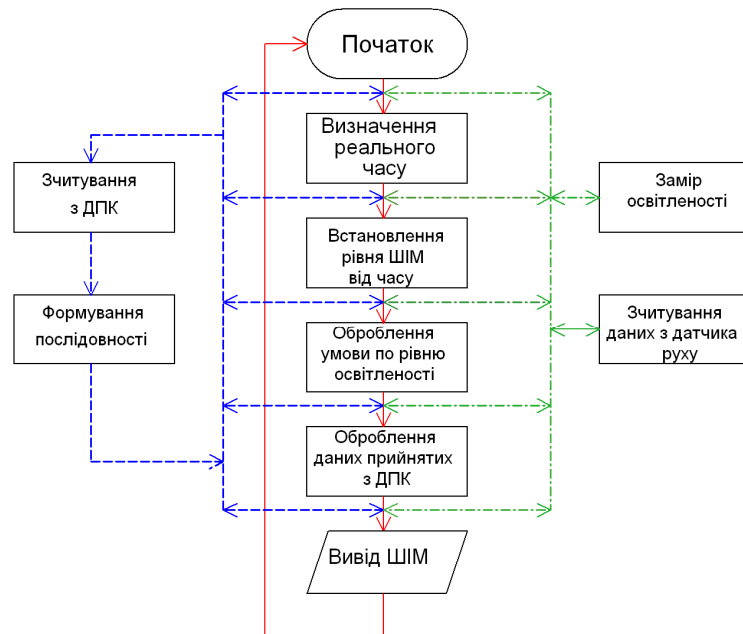


Рис. 16 - Алгоритм роботи інтелектуальної освітлювальної системи

В результаті моделювання було отримано 35 значень кольорової температури білого світіння в діапазоні від 3100K до 7000K з індексом кольоропередачі більше 80, які зображені на рис.17. Проміжні значення система отримує за рахунок апроксимування. Система має можливість змінювати колірну температуру світіння у відповідності з часом доби, а також надає можливість користувачу отримувати окрім білого світіння різноманітні відтінки за рахунок змішування випромінення RGB світлодіодів.

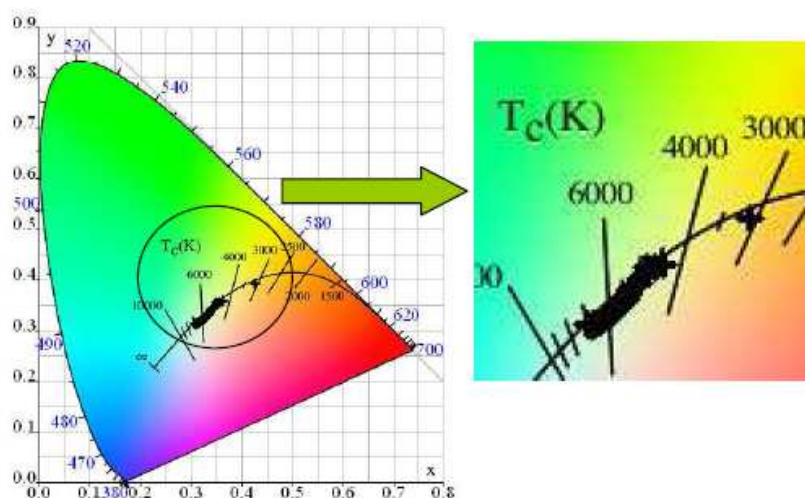


Рис. 17 - Отримані 35 значень колірної температури білого світіння

### Дослідження параметрів та характеристик світлодіодного модуля інтелектуальної освітлювальної системи

Основним недоліком використання RGBW світлодіодів в інтелектуальних освітлювальних системах є різні залежності яскравості кожного світлодіода від температури. Це означає, що коли світлодіодний модуль з запрограмованим білим кольором світіння (Рис.18) нагріється, його світіння буде не білого кольору. Тому були проведені додаткові дослідження зміни колірної температури та світлового потоку від часу прогрівання світлодіодного модуля з метою оцінки оптимального охолодження світлодіодів конструкцією радіаторів. Результати досліджень наведено на Рис.19.



Рис. 18 - Світлодіодний модуль інтелектуальної освітлювальної системи

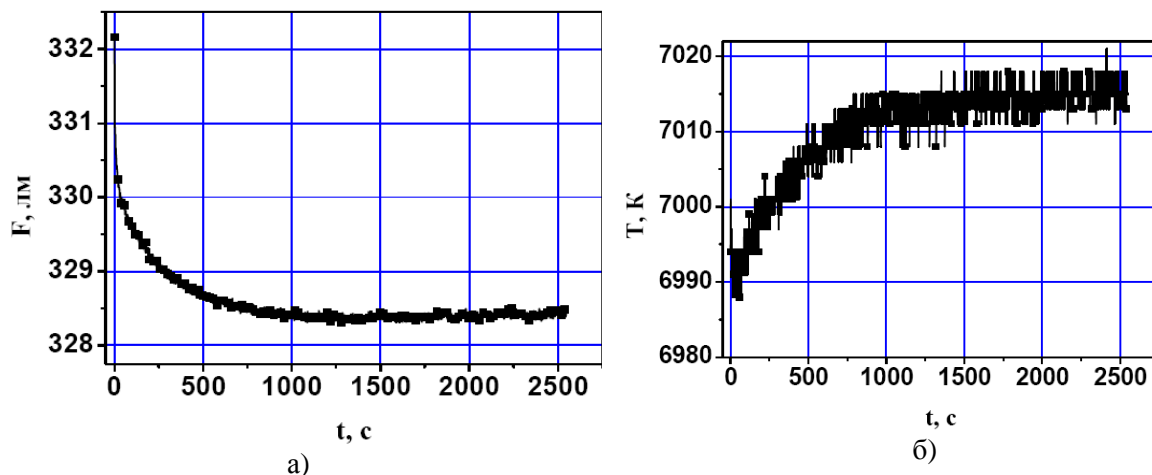


Рис. 19 - Залежність зміни а) світлового потоку та б) колірної температури від часу при прогріванні світлодіодного модуля інтелектуальної освітлювальної системи

З отриманих залежностей видно, що зміна світлового потоку та колірної температури склала 1% та 0,34%, відповідно. Оскільки різниця початкових і кінцевих значень незначна, можна вважати, що відвід тепла від світлодіодів виконано правильно.

В даній системі RGBW світлодіоди знаходяться в одному корпусі і мають одну спільну світлоформуючу лінзу. Оскільки кожен з кристалів не знаходиться в фокусі лінзи, то світіння окремого світлодіода має різну криву сили світла (Рис.20). Кут між найбільш віддаленими максимумами світіння червоного та синього світлодіодів склав  $60^\circ$ , це означає, що під різними кутами спостереження око буде бачити відтінки світла з різною колірною температурою – тобто маємо велику хроматичну аберацию системи.



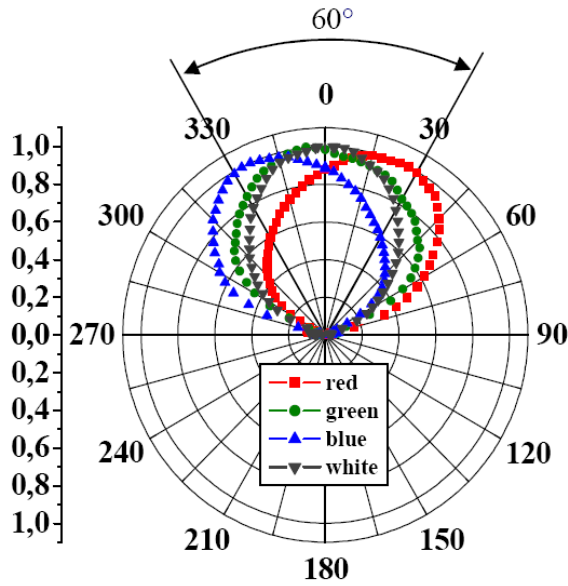


Рис. 20 - Крива сили світла кожного кристалу RGBW світлодіода світлодіодів

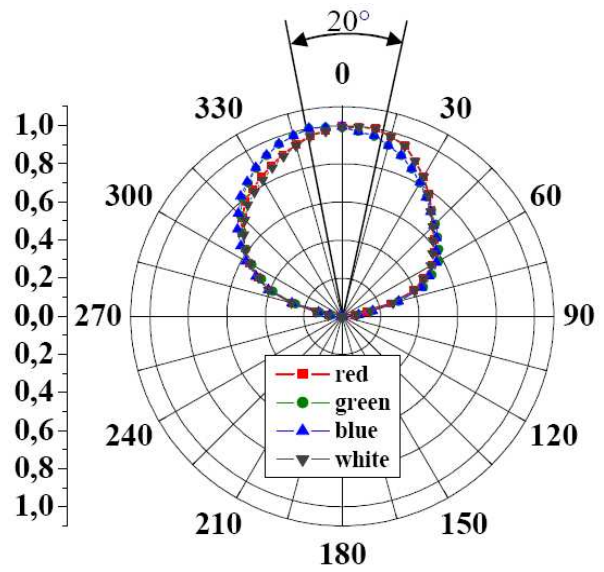


Рис. 21 - Крива сили світла від кожного кристалу в світлодіодному модулі

Щоб зменшити даний ефект в конструкцію світлодіодного модуля було внесено світлорозсіюючі та світлозмішуючі елементи, які за рахунок перевідбивання всередині них забезпечили необхідне змішування кольорів (рис. 21). З рис. 21 випливає, що завдяки внесеним змінам, хроматична аберація стала меншою і максимальний кут між крайніми максимумами склав  $20^\circ$ .

Окрім світлозмішуючих елементів до складу світлодіодного модуля додано світлоформуючий елемент в вигляді параболо-циліндричного відбивача. В результаті отримано криву сили світла модуля інтелектуальної світлодіодної системи, яка зображена на рис. 22.

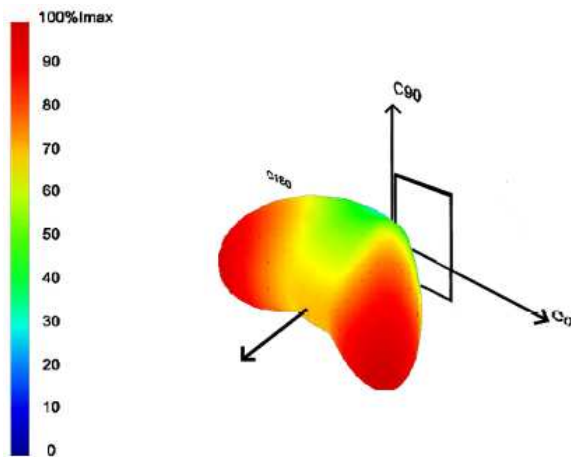


Рис. 22 - Крива сили світла світлодіодного модуля з світлоформуючою системою в об'ємному зображенні

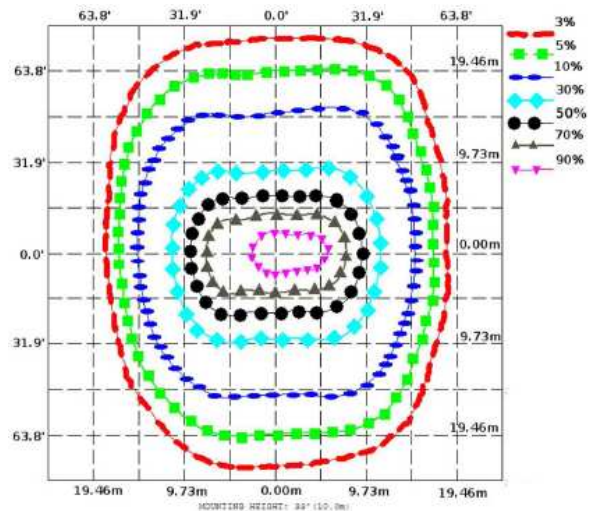


Рис. 23 - Ізолюксова діаграма світлодіодного модуля

З ізолюксової діаграми (Рис. 23) світлодіодного модуля видно, що світлоформуюча система створює рівномірну інтенсивність світла на робочій поверхні розмірами 10 на 10м. Завдяки цьому є можливість створювати світильники з розташуванням модулів, як показано на Рис. 24.



Рис. 24 - Макет світлоформуючої системи інтелектуального світлодіодного світильника, в якому світлодіодні модулі розміщені по колу

Електронні схеми керування конструктивно розташовуються в середині світлодіодного модуля. Це дозволяє спростити структуру інтелектуальної світлодіодної системи, але збільшує взаємні теплові впливи між електронними схемами керування та світлодіодними платами. Щоб визначити нагрів та поширення тепла в світлодіодному модулі було виконано тепловізійні вимірювання світлодіодного модуля після прогріву (Рис. 25).

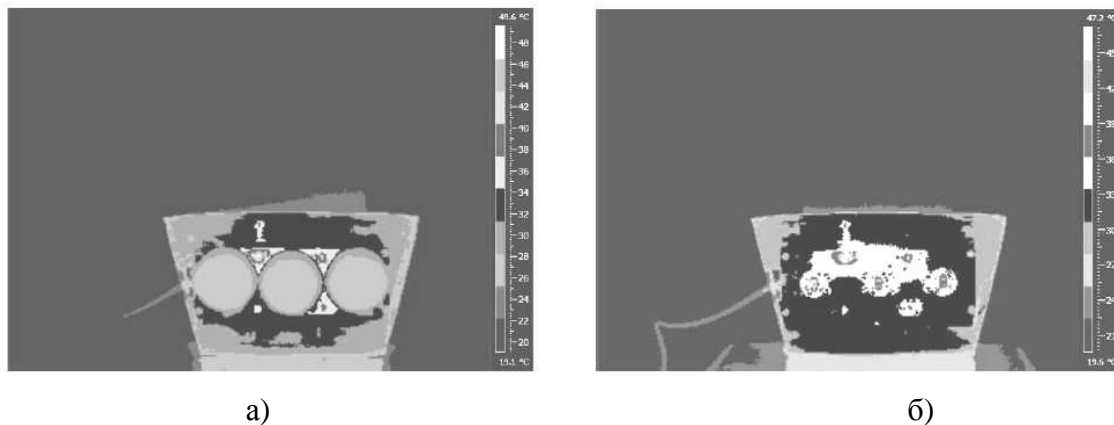


Рис. 25 - Тепловізійні картини світлодіодного модуля а) з ковпачками світлозмішувачами та б) без ковпачків світлозмішувачів після прогріву.

З отриманих розподілів тепла видно, що максимальна температура нагріву світлодіодної плати склала  $38^{\circ}\text{C}$ , а корпуса лінзи світлодіода  $40\text{--}42^{\circ}\text{C}$  при температурі оточуючого середовища  $20^{\circ}\text{C}$ . З відомого значення теплового опору світлодіода XLamp MC-E, яке складає  $4^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  [7] можна вирахувати приблизне значення температури кожного кристала світлодіода, яке складе  $42^{\circ}\text{C}$ . З цих значень можна вважати, що кристали світлодіода не перегріваються і зміни оптичних характеристик світлодіода від нагріву мінімальні.

### Висновки

Створений зразок інтелектуальної освітлювальної системи показав можливість ефективного керування нею в автоматичному режимі або користувачем, регулюючи колірну температуру та індекс кольоропередачі.

Показано, що при оптимальній конструкції світлодіодного модуля можливо забезпечити високу стабільність світлового потоку (1%) та заданої колірної температури (0,34%) при прогріві системи, що дає можливість використання інтелектуальної освітлювальної системи в широкому діапазоні навколишньої температури без значних змін оптичних параметрів.

Введення в систему світлорозсіюючих та світлозмішуючих елементів дозволило отримати більш рівномірний розподіл у просторі світлового потоку та спектру випромінення.

Показано, що розроблені світлодіодні модулі дають змогу створювати інтелектуальні освітлювальні системи різної потужності з різними діаграмами спрямованості, при цьому кожен модуль можна вмикати та вимикати з пульта дистанційного керування. Це все дає користувачу можливість формування зон освітленості, підвищує ергономічні властивості системи освітлення і збільшує економію електроенергії не тільки за рахунок енергетичної ефективності світлодіодів.

#### Література:

1. Sanjay Belgaonkar, E. Elavarasi, Gurjeet Singh Smart Lighting and Control using MSP430 & Power Line Communication /International Journal Of Computational Engineering Research / ISSN: 2250-3005 May-June 2012, Page 662-665.
2. В.И. Корнага, В.М. Сорокин, А.С. Олейник, А.Д. Галинский Интеллектуальные светодиодные системы освещения на основе RGBW светодиодов. //В кн. Сборник тезисов докладов 21-й международный симпозиум «Передовые дисплейные и световые технологии» -Москва 2013, ст.71.
3. Монтаж и установка системы.: "Умный дом" Режим доступа до стор. <http://www.aptech.ru/umnyj-dom>
4. GreenChip smart lighting. Режим доступа до стор. <http://www.nxp.com/campaigns/greenchip/smartlighting>
5. J. Langfeld, M. Zimmermann, K. Dostert: Power Line Communications System Design Strategies for Local Loop Access. Proceedings of the Workshop Kommunikationstechnik, Technical Report ITUU-TR-1999/02, Page 21-26.
6. Van Bommel, W.J.M. , 2006. Dynamic Lighting at work- both in level and colour. Proceedings 2nd CIE expert symposium "Lighting and Health" CIE Publication x031: Ottawa 2006, p62-67.
7. Product family data sheet XLamp MC-E. Режим доступа до стор. <http://www.cree.com/led-components-and-modules/products/xlamp/arrays-directional/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampMCE.pdf>

## СОЗДАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В. И. Корнага, В. М. Сорокин, А. С. Олейник, А. Д. Галинский

*Рассмотрены проблемы создания интеллектуальных осветительных систем и основные принципы их построения с использованием комбинации белых светодиодов с определенной цветовой температурой и монохромных RGB светодиодов. Предложены электронные методы управления интеллектуальными системами освещения и средства для их реализации. Приводятся параметры и характеристики созданного опытного образца интеллектуальной осветительной системы.*

## CREATING AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF INTELLIGENT LIGHTING SYSTEMS

V. I. Kornaga, V. M. Sorokin, O. S. Oliynyk, O. D. Galinskiy

*The problems of smart lighting systems creation and basic principles of their construction using a combination of white LEDs with a specific color temperature and monochrome RGB LEDs are shown. Electronic methods for control of smart lighting systems and means for their implementation are proposed. Parameters and characteristics of a prototype created intellectual lighting system are presented.*