

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Зовнішнє освітлення є важливою складовою благоустрою населених пунктів країни. Якісне зовнішнє освітлення дозволяє підвищити безпеку руху автомобільного транспорту та пішоходів, знизити рівень вандалізму та крадіжок, що в свою чергу призводить до зниження матеріальних та людських втрат.

На сьогоднішній день в значній частині населених пунктів України зовнішнє освітлення є енергозатратним або практично відсутнім. Це в першу чергу стосується сільської місцевості та периферійних районів міст. Такий стан сфери зовнішнього освітлення зумовлений недостатнім рівнем фінансування. Як наслідок, вже в існуючих світлотехнічних установках використовуються застарілі, зношені світлові прилади (СП) із низькоефективними джерелами світла (ДС), що зумовлює нераціональне використання електричної енергії та низький рівень кількісних та якісних показників освітлювальних установок (ОУ).

Одним із способів підвищення енергетичної ефективності ОУ зовнішнього освітлення є заміна низькоефективних ДС (таких, як лампи розжарювання та дугові ртутні лампи) на компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) потужністю 35-240 Вт з досить високими значеннями світловіддачі (50-80 лм/Вт), можливістю «теплого запуску» та діапазоном робочих температур від  $-30$  до  $+45$  °С.

Питаннями проектування та енергетичної ефективності установок зовнішнього освітлення і світлотехнічних характеристик КЛЛ займалися ряд провідних вчених: Айзенберг Ю.Б., Кожушко Г.М., Харченко В.Ф., Куц О.К., Schruben J. S., Keller J.B. та ін.

Залишилися невирішені задачі розрахунку СП з ДС із заданими розмірами світного тіла, якими є КЛЛ, та поведінка даних джерел світла в умовах замкнутого середовища світлового приладу.

Тому розробка науково-технічних основ впровадження КЛЛ в системи зовнішнього освітлення є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової теми “Регулювання потужності розрядних джерел світла енергоощадними електронними пускорегулювальними апаратами” (номер державної реєстрації 0111U005287).

**Мета й задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності установок зовнішнього освітлення за рахунок впровадження СП із КЛЛ. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Аналіз світлотехнічних систем зовнішнього освітлення та визначення основних факторів, що впливають на якісні показники і енергетичну ефективність ОУ.

2. Розробка методики розрахунку СП із заданими розміри світного тіла ДС та проведення на її основі розрахунку світлового приладу з КЛЛ.

3. Побудова моделі освітлення для різних категорій вулиць, проведення розрахунку світлотехнічних параметрів ОУ та розробка рекомендацій для практичного впровадження КЛЛ в системах зовнішнього освітлення.

4. Дослідження характеристик компактних люмінесцентних ламп при зміні температури навколишнього середовища та проведення аналізу теплового режиму СП із КЛЛ.

5. Дослідження впливу КЛЛ на показники якості електричної енергії в системах зовнішнього освітлення та розробка рекомендацій щодо їх покращення.

**Об'єкт дослідження** – процеси в системах зовнішнього освітлення населених пунктів.

**Предмет дослідження** – світлові прилади та світлотехнічні установки зовнішнього освітлення із компактними люмінесцентними лампами.

**Методи дослідження.** Поставлені завдання вирішувалися на основі: а) використання стандартних фотоелектричних методів фотометрії; б) методів 3D моделювання при проектуванні та виготовленні СП; в) використання методів аналізу та математичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Числові розрахунки та моделювання проводилися з використанням програмних засобів MatLab, SolidWorks, TracePro.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше розроблено математичну модель та проведено розрахунок оптичної системи світлового приладу із світним тілом заданих геометричних розмірів.

2. Отримала подальший розвиток математична модель для розрахунку світлового поля КЛЛ, що враховує специфіку її геометричних розмірів.

3. Побудовано модель освітлення для різних категорій вулиць, що дозволяє розраховувати якісні та кількісні показники ОУ.

4. Встановлено, що при температурі зовнішнього середовища від  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура ЕПРА КЛЛ в СП зовнішнього освітлення не перевищує  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відповідає допустимій робочій температурі.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблено методику розрахунку СП із заданими розмірами світного тіла ДС. На її основі проведено розрахунок та виготовлено відбивач СП для зовнішнього освітлення, в якому використано лампу КЛЛ.

2. Запропоновано методику та розроблено програмне забезпечення для розрахунку освітлювальної установки з СП із КЛЛ при проектуванні системи вуличного освітлення.

3. Удосконалено методику визначення відносної похибки індукційного та електронного лічильників залежно від показників якості електроенергії.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи отриманні автором самостійно. У [1] удосконалено методику вимірювання відносної похибки індукційного та електронного лічильників, яка враховує показники якості електроенергії. У [2, 3, 4] проведено аналіз енергетичної ефективності зовнішнього освітлення регіонів України. У [5] проведено моделювання СП з неточковим ДС. У [6] здійснено експериментальні дослідження енергетичної ефективності СП для зовнішнього освітлення із різнотипними ДС. У [7] розроблена математична модель та проведено розрахунок оптичної системи світлового приладу із світним тілом заданих геометричних

розмірів. У [8] проведено аналіз стану зовнішнього освітлення населених пунктів сільської місцевості. У [9] проведено моделювання світлового поля КЛЛ з спіральною формою світлого тіла та створено програмне забезпечення для розрахунку освітленості від даного ДС. У [10] проведено експериментальні дослідження та статистичну обробку результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації оприлюднені та обговорені на: XV науково-технічній конференції, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи» (м. Тернопіль, 24 - 26 квітня 2012 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Современные тенденции развития светотехники» (Харків, 15-16 травня 2013 р.); XVII науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 20-21 листопада 2013 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці МЕЕС 14» (Київ, 1-3 жовтня 2014 р.); XVIII науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 29-30 жовтня 2014 р.).

**Публікації.** Результати наукових досліджень опубліковані у 10 наукових працях, з яких 7 – у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України як фахові (у тому числі 1 стаття у закордонному фаховому виданні), 6 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 118 найменувань на 12 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 144 сторінки, з них 127 основного тексту, 92 рисунки та 12 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні задачі дослідження, показано зв'язок із науковими програмами та темами, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** дано оцінку загальному стану проблеми, її значенню та зроблено аналіз результатів, отриманих іншими авторами. Головна увага приділена напрямкам наукових досліджень в області підвищення енергетичної ефективності систем зовнішнього освітлення за рахунок впровадження енергоощадних КЛЛ. Показано актуальність проблеми, сформульовано завдання і визначено основні напрямки досліджень.

У **другому розділі** викладено результати досліджень світлотехнічних параметрів світлових приладів для вуличного освітлення із нетиповими для них ДС. Розроблено методику розрахунку оптичної системи СП із заданими розмірами світлого тіла. Проведено розрахунок та виготовлено відбивач СП для вуличного освітлення із КЛЛ.

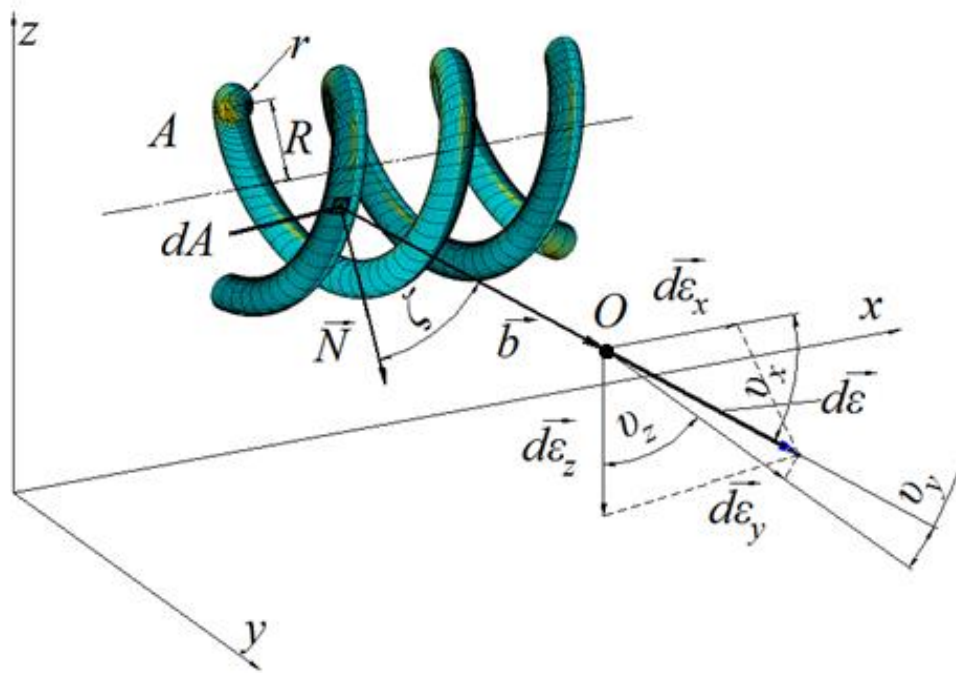


Рис. 1. Геометричне представлення моделі КЛЛ із спіральною формою світлого тіла

На основі результатів експериментальних досліджень світлотехнічних параметрів СП для вуличного освітлення типу ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У та ЖКУ, РКУ Helios 21 із нетиповими для них ДС встановлено, що при використанні у даних світлових приладах компактних люмінесцентних ламп їх коефіцієнт корисної дії (ККД) знижується на 14...17 %.

Проведено моделювання світлового поля КЛЛ, світне тіло якої представлено у вигляді двох спіралеподібних трубок (рис.1).

Для характеристики світлового поля було використано світловий вектор  $\vec{\varepsilon}$ , який представлено його ортогональними проекціями  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ :

$$\varepsilon_x = L \int_A \frac{\cos(\zeta) \cos(\vartheta_x)}{|\vec{b}|^2} dA, \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = L \int_A \frac{\cos(\zeta) \cos(\vartheta_y)}{|\vec{b}|^2} dA, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = L \int_A \frac{\cos(\zeta) \cos(\vartheta_z)}{|\vec{b}|^2} dA, \quad (3)$$

де  $L$  - яскравість ділянки випромінювача  $dA$ ;

$\zeta$  – кут між головною нормаллю  $\vec{N}$  до елемента випромінювача  $dA$  та вектором  $\vec{b}$ , направленим від цього елемента до досліджуваної точки світлового поля  $O$ ;

$\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$  – кути між вектором  $\vec{b}$  та відповідними осями координат.

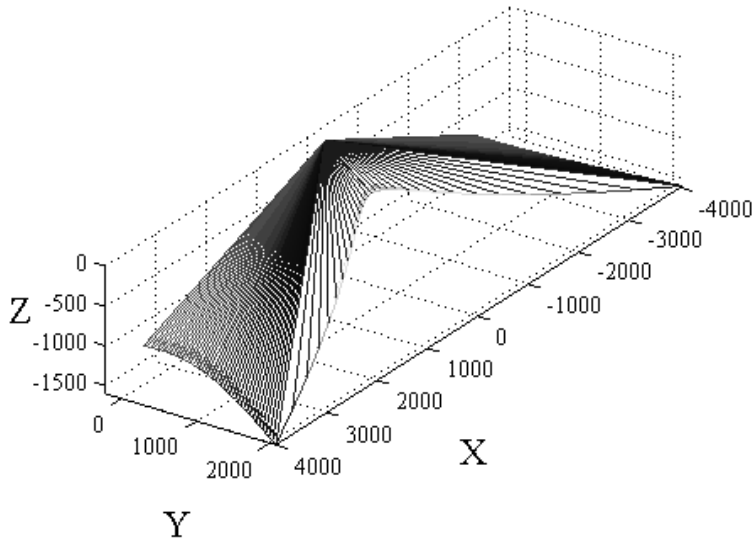


Рис. 2. Фотометричне тіло СП, що забезпечує рівномірне освітлення горизонтальної поверхні дорожнього покриття

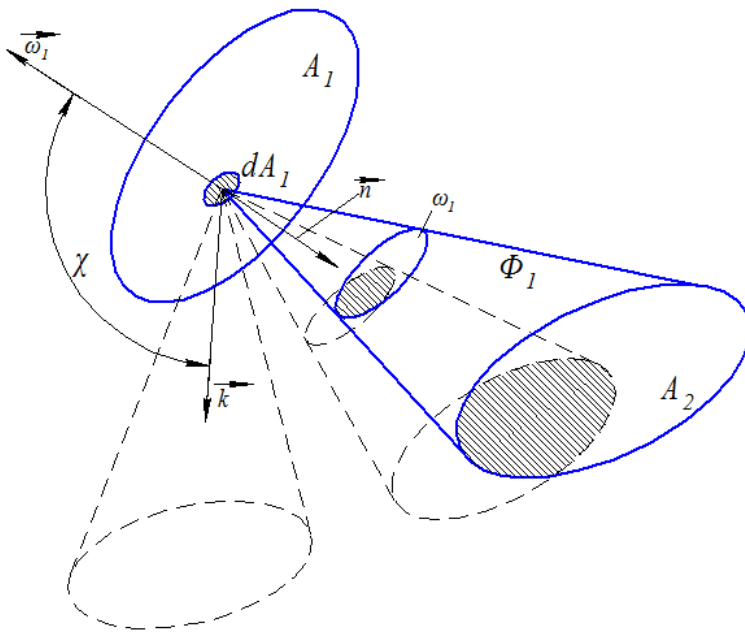


Рис. 3. Геометричне представлення моделі системи «світне тіло – відбивач»:  $A_1$  – поверхня відбивача,  $A_2$  – поверхня світного тіла,  $\Phi_1$  – падаючий світловий потік від поверхні  $A_2$  на елементарну ділянку відбивача  $dA_1$ , який зосереджений в тілесному куті  $\omega_1$ ,  $\vec{n}$  – вектор нормалі до елемента  $dA_1$

забезпечує вихід світлового потоку у зовнішню область, внаслідок екранування його поверхнею світного тіла (рис. 4).

При розрахунку світлового поля було враховано особливості геометрії та форми світного тіла даного випромінювача, що дозволило підвищити точність отриманих результатів на 40 – 60 %.

У роботі розроблено методику розрахунку відбивача СП із світним тілом заданих геометричних розмірів. При цьому для вхідних даних було додатково розраховано фотометричне тіло СП для вуличного освітлення, що забезпечує необхідні нормативні показники освітленості поверхні дорожнього покриття (рис. 2).

Для розрахунку оптичної системи СП з ДС заданих розмірів було розроблено математичну модель системи «світне тіло – відбивач», геометричне представлення якої наведено на рис. 3.

Із рис. 3 видно, що коли вектор  $\vec{n}$  направлений на поверхню  $A_2$ , то світловий потік  $\Phi_1$ , який падає на елементарну ділянку  $dA_1$ , після відбивання частково або повністю попаде на цю поверхню. Дана умова дозволяє визначити множину всіх елементарних ділянок, що утворюють критичну ділянку відбивача, яка не



Рис. 4. Критична ділянка відбивача

Щоб уникнути попадання світлового потоку, відбитого від відбивача СП на ДС, проведено розрахунок зміни форми критичної ділянки. Рівняння поверхні цієї ділянки відбивача зміненої форми має вигляд:

$$f(x, y, z) = \int_{x_0}^{x_k} W(x, y, z) dx + \int_{y_0}^{y_k} M(x_0, y, z) dy + \int_{z_0}^{z_k} R(x_0, y_0, z) dz, \quad (4)$$

$$\text{де } W = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{K_x + P_x}{\sqrt{2 - 2 \cos \chi}}; \quad M = \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{K_y + P_y}{\sqrt{2 - 2 \cos \chi}};$$

$$R = \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{K_z + P_z}{\sqrt{2 - 2 \cos \chi}};$$

$P_x, P_y, P_z$  – координати вектора  $\vec{\omega}_1$  тілесного кута  $\omega_1$ ;

$K_x, K_y, K_z$  – координати вектора  $\vec{k}$ , що задає напрямок в якому буде перенаправлятися світловий потік;

$\chi$  – кут між векторами  $\vec{\omega}_1$  та  $\vec{k}$ .

Даний розрахунок було проведено для відбивача СП із КЛЛ Realux 55 Вт. Профіль відбиваючої поверхні показано на рис. 5.

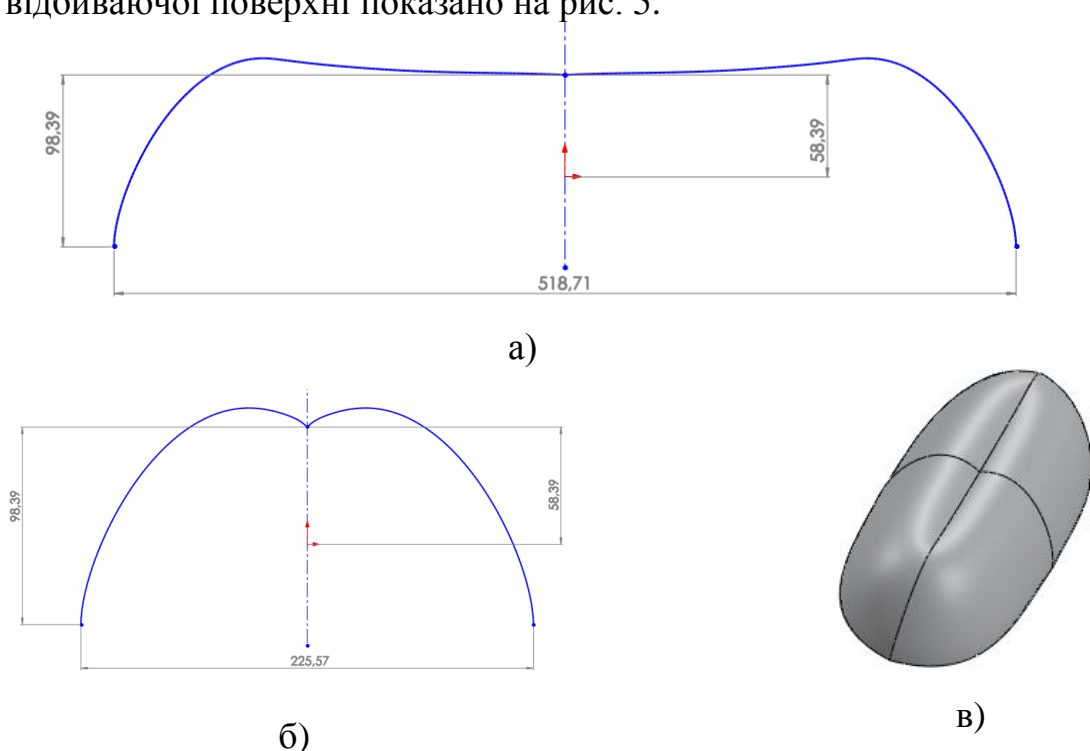


Рис. 5. Поверхня відбивача СП із КЛЛ Realux 55 Вт: а) повздовжній переріз поверхні відбивача, б) поперечний переріз поверхні відбивача, в) 3D модель

На рис. 6 приведено зображення відбивача, виготовленого за допомогою 3D принтера за представленими результатами розрахунку його поверхні.



Рис. 6. Відбивач СП зовнішнього освітлення із КЛЛ Realux 55 Вт

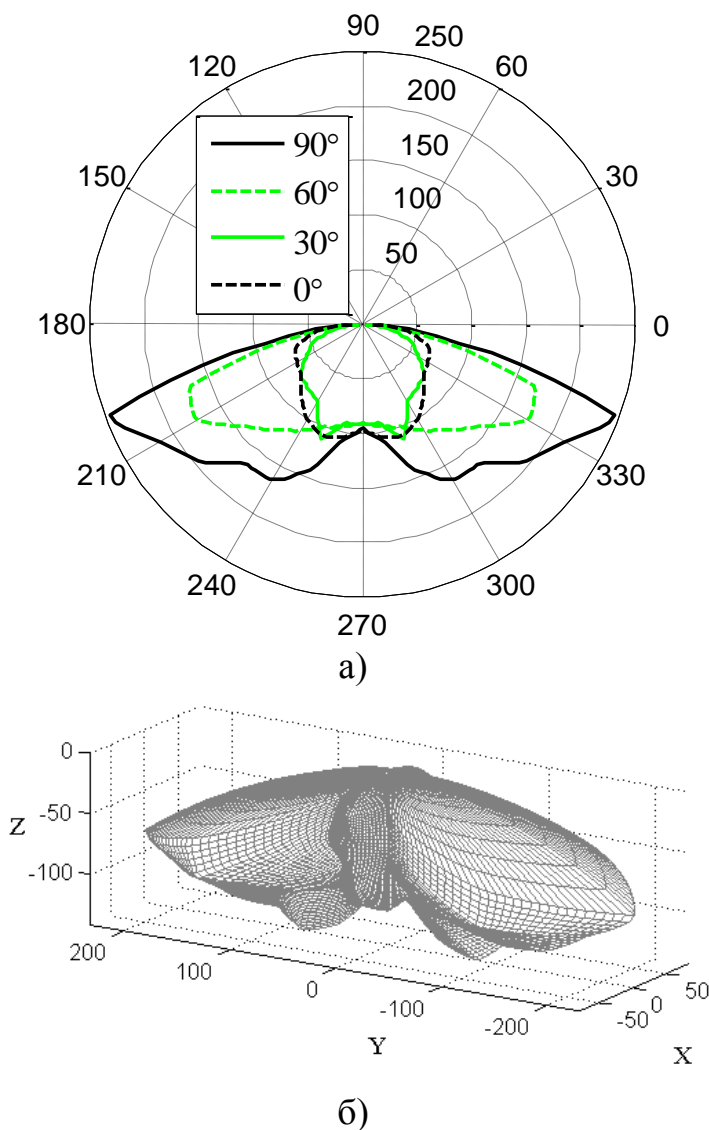


Рис. 7. Світлорозподіл СП із КЛЛ Realux 55 Вт: а) криві сили світла, б) фотометричне тіло

Для даного СП побудовано криві сили світла для різних нахилів меридіальної площини (рис. 7,а). Світловий потік  $\Phi_{СП}$  приведено до умовного світлового потоку  $\Phi_{1000} = 1000$  лм. За даними кривими сили світла побудовано його фотометричне тіло СП із КЛЛ (рис. 7,б).

Встановлено, що для СП з відбивачем, який був розрахований без урахування геометричних розмірів ДС, ККД  $\eta_{СП} = 0,62$ . Для СП із поверхнею відбивача, при розрахунку якої були враховані розміри світного тіла,  $\eta_{СП} = 0,79$ .

При аналізі світлотехнічних параметрів СП із КЛЛ при зміні геометричних розмірів світного тіла ДС встановлено, що збільшення розмірів ДС призводить до зменшення  $\eta_{СП}$ , при цьому збільшення діаметра колби лампи має більший вплив, ніж збільшення її довжини (рис. 8, 9). При збереженні максимальних розмірів світного



тіла зміна його форми на значення  $\eta_{СП}$  практично не впливає.

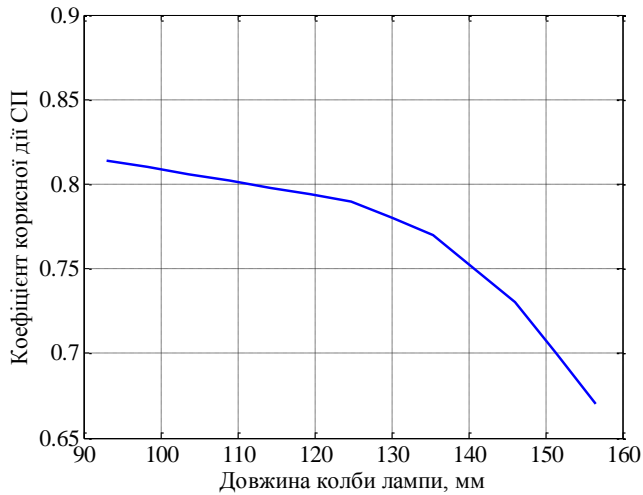


Рис. 8. Залежність  $\eta_{СП}$  від діаметра колби КЛЛ

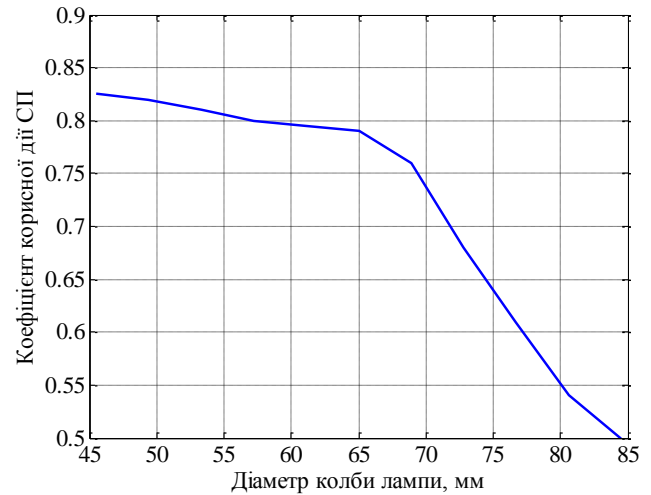


Рис. 9. Залежність  $\eta_{СП}$  від довжини колби КЛЛ

На основі аналізу каталогових даних КЛЛ різних світлотехнічних фірм побудовано графічну залежність номінальної потужності від їх геометричних розмірів (рис. 10).

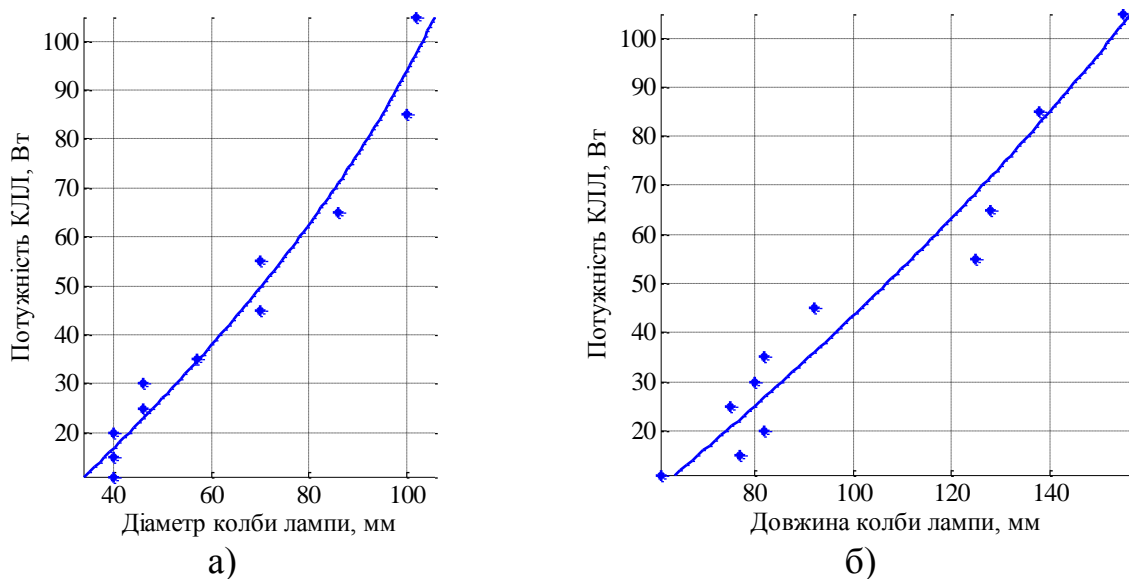


Рис. 10. Залежність номінальної потужності від а) діаметра та б) довжини колби КЛЛ

За отриманими залежностями встановлено, що для розрахованого СП допустимі розміри світлого тіла КЛЛ відповідають діапазону номінальних потужностей від 11 до 53 Вт.

У третьому розділі побудовано модель освітлення для різних категорій вулиць, на її основі проведено розрахунок світлотехнічних параметрів ОУ вуличного освітлення та співставлення їх із нормативними значеннями.

Геометричне представлення ОУ приведено на рис. 11.



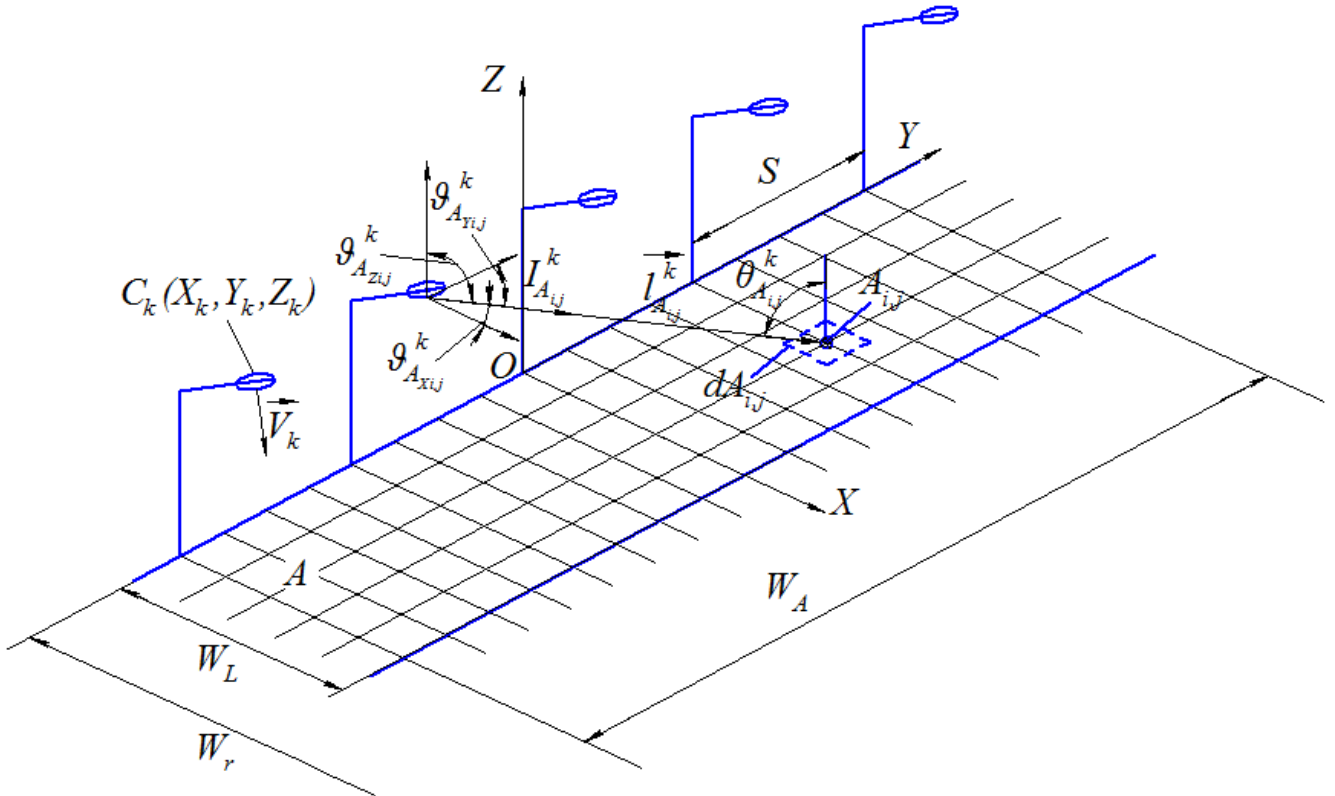


Рис. 11. Геометричне представлення ОУ вуличного освітлення

Світлорозподіл СП задавався масивами точок  $I_X$ ,  $I_Y$ ,  $I_Z$ , які описували поверхню фотометричного тіла (див. рис. 7):

$$\begin{aligned}
 I_X &= \begin{pmatrix} I_{X1,1} & I_{X1,2} & \dots & I_{X1,q} \\ I_{X2,1} & I_{X2,2} & \dots & I_{X2,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{Xp,1} & I_{Xp,2} & \dots & I_{Xp,q} \end{pmatrix}; \\
 I_Y &= \begin{pmatrix} I_{Y1,1} & I_{Y1,2} & \dots & I_{Y1,q} \\ I_{Y2,1} & I_{Y2,2} & \dots & I_{Y2,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{Yp,1} & I_{Yp,2} & \dots & I_{Yp,q} \end{pmatrix}; \\
 I_Z &= \begin{pmatrix} I_{Z1,1} & I_{Z1,2} & \dots & I_{Z1,q} \\ I_{Z2,1} & I_{Z2,2} & \dots & I_{Z2,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{Zp,1} & I_{Zp,2} & \dots & I_{Zp,q} \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Значення сил світла  $I_{p,q}$  визначалися за формулою:

$$I_{p,q} = \sqrt{I_{Xp,q}^2 + I_{Yp,q}^2 + I_{Zp,q}^2}. \tag{6}$$

Напрямок сили світла  $I_{p,q}$  задавався кутами  $\lambda_{p,q}$ ,  $\mu_{p,q}$ ,  $\tau_{p,q}$ , значення яких визначалися за формулами:

$$\begin{aligned}\lambda_{p,q} &= \arccos\left(\frac{I_{Xp,q}}{I_{p,q}}\right), \\ \mu_{p,q} &= \arccos\left(\frac{I_{Yp,q}}{I_{p,q}}\right), \\ \tau_{p,q} &= \arccos\left(\frac{I_{Zp,q}}{I_{p,q}}\right),\end{aligned}\quad (7)$$

де  $\lambda_{p,q}$ ,  $\mu_{p,q}$ ,  $\tau_{p,q}$  – кути між  $I_{p,q}$  та осями координат  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ , відповідно.

Освітленість  $E_{A_{i,j}}$  елементарної ділянки  $dA_{i,j}$  дорожнього покриття визначали за формулою:

$$E_{A_{i,j}} = \sum_{m=1}^k E_{A_{i,j}}^k, \quad (8)$$

де  $E_{A_{i,j}}^k$  – освітленість від  $k$ -го СП:

$$E_{A_{i,j}}^k = \frac{I_{A_{i,j}}^k}{(l_{A_{i,j}}^k)^2} \cos(\theta_{A_{i,j}}^k), \quad (9)$$

де  $I_{A_{i,j}}^k$  – сила світла від  $k$ -го СП в напрямку ділянки  $dA_{i,j}$ ;

$l_{A_{i,j}}^k$  – відстань від  $k$ -го СП до  $dA_{i,j}$ ;

$\theta_{A_{i,j}}^k = \arccos\left(Z_k/l_{A_{i,j}}^k\right)$  – кут між напрямком сили світла  $I_{A_{i,j}}^k$  і нормаллю до ділянки  $dA_{i,j}$ .

Відстань  $l_{A_{i,j}}^k$  до ділянки  $dA_{i,j}$ :

$$l_{A_{i,j}}^k = \sqrt{(A_{Xi,j} - X_k)^2 + (A_{Yi,j} - Y_k)^2 + (A_{Zi,j} - Z_k)^2}, \quad (10)$$

де  $X_k$ ,  $Y_k$ ,  $Z_k$  – координати оптичного центра  $k$ -го СП.

Напрямок сили світла  $I_{A_{i,j}}^k$  характеризувався вектор  $\vec{l}_{A_{i,j}}^k$  (див. рис. 11). Кути  $g_{A_{Xi,j}}^k$ ,  $g_{A_{Yi,j}}^k$ ,  $g_{A_{Zi,j}}^k$ , які задавали напрямок сили світла  $I_{A_{i,j}}^k$ , розраховували за формулами:

$$\begin{aligned}
g_{A_{X_i,j}}^k &= \arccos \left( \frac{A_{X_i,j} - X_k}{l_{A_i,j}^k} \right), \\
g_{A_{Y_i,j}}^k &= \arccos \left( \frac{A_{Y_i,j} - Y_k}{l_{A_i,j}^k} \right), \\
g_{A_{Z_i,j}}^k &= \arccos \left( \frac{A_{Z_i,j} - Z_k}{l_{A_i,j}^k} \right).
\end{aligned} \tag{11}$$

Сила світла  $I_{A_i,j}^k$  вибиралася із масиву значень сил світла  $I_{p,q}$  (6), для якої кути  $\lambda_{p,q}$ ,  $\mu_{p,q}$ ,  $\tau_{p,q}$  співпадали із кутами  $g_{A_{X_i,j}}^k$ ,  $g_{A_{Y_i,j}}^k$ ,  $g_{A_{Z_i,j}}^k$ .

Результати розрахунків розподілу освітленості на поверхні дороги приведені на рис. 12.

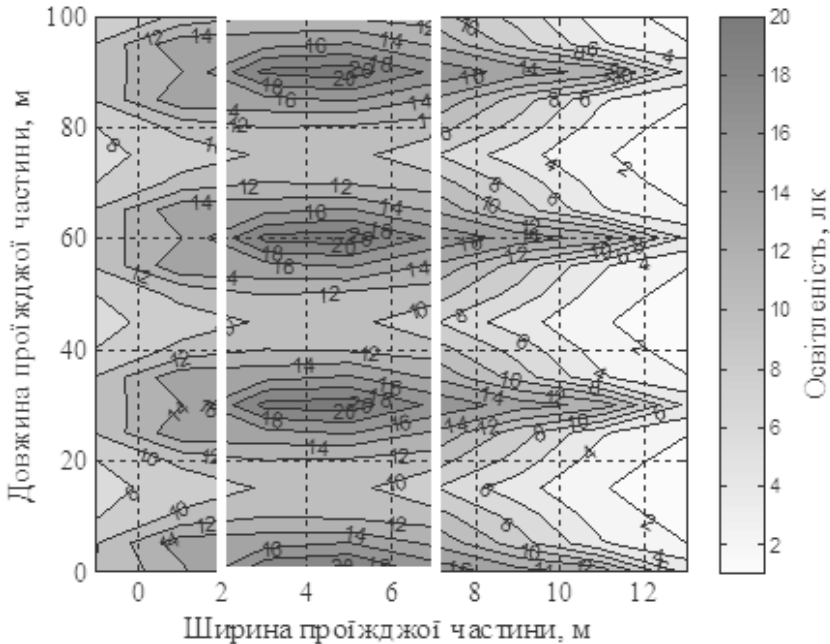


Рис. 12. Ізолінії освітленості на проїжджій частині дороги (область проїжджої частини дороги виділена білою лінією)

$r_{A_i,j}^n$  – коефіцієнт яскравості в точці  $A_i,j$  від  $k$ -го СП відносно спостерігача, розташованого на  $n$ -ій смузі руху.

Коефіцієнт загальної рівномірності яскравості  $U_0$  розраховувався за формулою:

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_{\text{сеп}}}. \tag{13}$$

де  $L_{\min}$ ,  $L_{\text{сеп}}$  – мінімальна та середня яскравості дорожнього покриття, відповідно.

У роботі проведено розрахунок показників яскравості дорожнього покриття. Середня яскравість  $L_{\text{сеп}}^n$  для кожної  $n$ -ої смуги руху розраховувалась як середнє арифметичне значення  $L_{A_i,j}^n$  в кожній точці  $A_i,j$  відносно спостерігача, розташованого на даній смузі руху:

$$L_{\text{сеп}}^n = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N L_{A_i,j}^n, \tag{12}$$

$$\text{де } L_{A_i,j}^n = \frac{1}{K_3 \pi} \sum_{m=1}^k r_{A_i,j}^n E_{A_i,j}^k;$$

$K_3$  – коефіцієнт запасу;

Значення  $L_{сер}$  визначалося, як середнє арифметичне значень яскравості  $L_{A_{i,j}}$  в кожній точці  $A_{i,j}$  відносно спостерігача, лінія зору, якого направлена під кутом  $1^\circ$  до площини дороги:

$$L_{сер} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N L_{A_{i,j}}. \quad (14)$$

Яскравість  $L_{A_{i,j}}$  розраховувалась за формулою:

$$L_{A_{i,j}} = \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^k r_{A_{i,j}k} E_{A_{i,j}}^k. \quad (15)$$

де  $r_{A_{i,j}k}$  – коефіцієнт яскравості в точці  $A_{i,j}$  для  $k$ -го СП відносно спостерігача, який розташовувався на осьовій лінії дороги.

Мінімальна яскравість  $L_{мін}$  бралась із масиву значень  $L_{A_{i,j}}$ .

Коефіцієнт повздовжньої рівномірності яскравості  $U_1$  розраховувався за формулою:

$$U_1 = \frac{L_{1мін}}{L_{1макс}}. \quad (16)$$

де  $L_{1мін}$ ,  $L_{1макс}$  – мінімальна та максимальна яскравості вздовж осьової лінії дороги, які вибирались із масиву значень  $L_{A_{i,j}}$ , відповідно.

На основі моделі освітлення вулиць проведено розрахунок ОУ вуличного освітлення із використанням СП із КЛЛ. Для визначення оптимальної орієнтації СП побудовано залежності середньої яскравості  $L_{сер}^n$ , коефіцієнтів  $U_0$  та  $U_1$  від кута нахилу  $\gamma$  оптичної осі СП до осі  $OZ$  в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (рис. 13, 14).

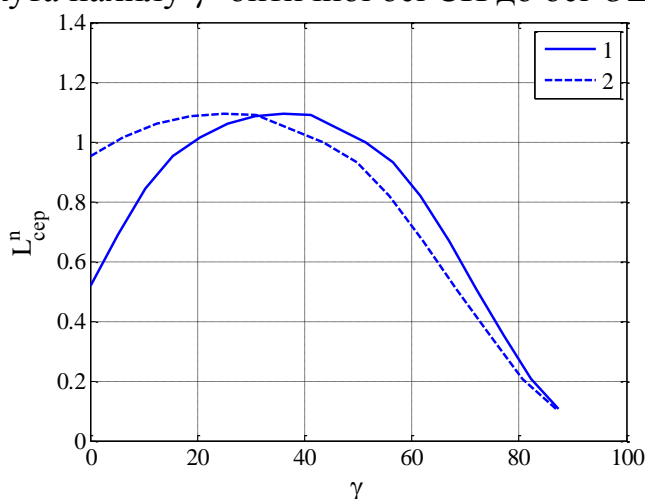


Рис. 13. Залежність  $L_{сер}^n$  від кута  $\gamma$ : 1 – для першої смуги руху, яка розташована ближче до СП, 2 – для другої смуги руху

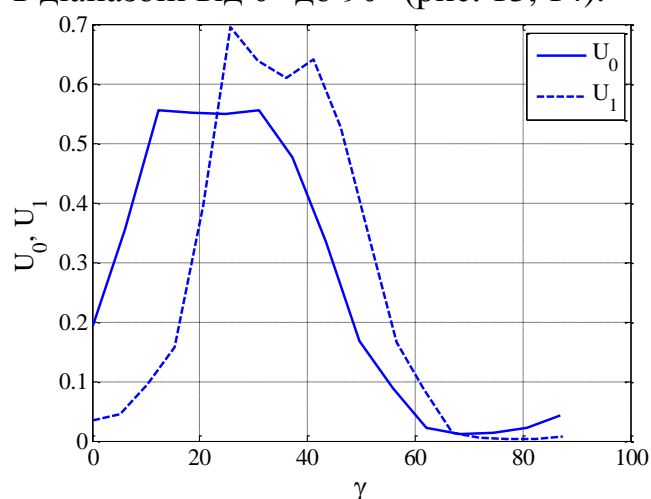


Рис. 14. Залежність коефіцієнтів  $U_0$  та  $U_1$  від кута  $\gamma$

Для визначення максимально допустимої відстані між опорами при збереженні нормативних показників освітленості та яскравості проведено побудову залежності яскравості  $L_{\text{сеп}}^n$  та коефіцієнтів  $U_0$  та  $U_1$  при зміні відстані  $S$  між СП в діапазоні від 30 до 60 м (рис. 15, 16).

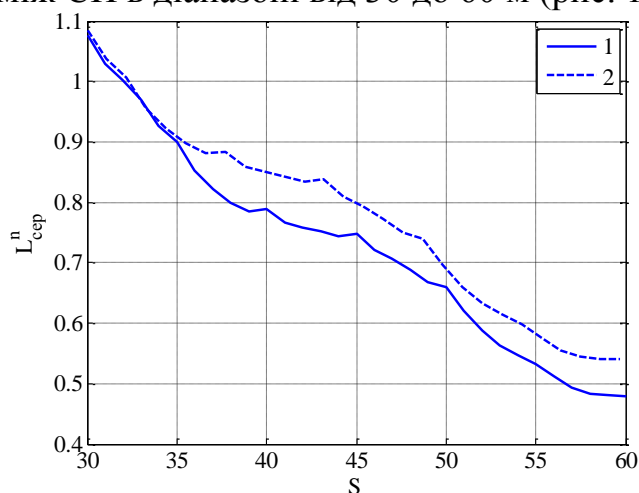


Рис. 15. Залежність  $L_{\text{сеп}}^n$  від  $S$ :  
1 – для першої смуги руху, яка розташована ближче до СП, 2 – для другої смуги руху

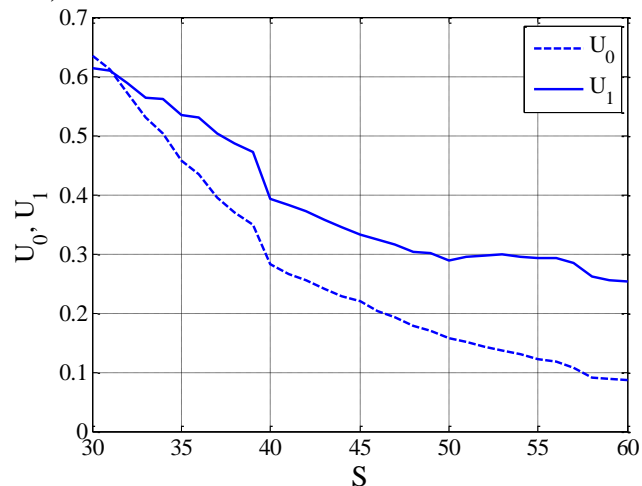


Рис. 16. Залежність коефіцієнтів  $U_0$  та  $U_1$  від  $S$

Із отриманих залежностей встановлено, що для досягнення найкращих значень нормативних показників, оптимальне значення кута  $\gamma = 31^\circ$  та максимальна відстань між опорами для категорій вулиць М4 та М5 складає 37 м, а для категорії М3 – 33 м.

**У четвертому розділі** проведено дослідження впливу температури навколишнього середовища на світлотехнічні характеристики КЛЛ із вбудованим ЕПРА в СП для зовнішнього освітлення. Дослідження проводили в термостатичній камері в діапазоні температур від  $-25^\circ\text{C}$  до  $+25^\circ\text{C}$ . Контроль температури здійснювали за допомогою температурних датчиків ds18b20 (Dallas) з точністю  $0,5^\circ\text{C}$ . При цьому КЛЛ розміщували під кутом  $31^\circ$  до горизонту цоколем вниз.

Встановлено, що при температурі навколишнього середовища  $+25^\circ\text{C}$ , температура в корпусі ЕПРА не перевищує  $+40^\circ\text{C}$  для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт (рис. 17). Час від моменту включення до усталеної температури для всіх досліджуваних КЛЛ дорівнював близько 40 хв. При розташуванні досліджуваних КЛЛ в СП температура в корпусі ЕПРА зростала до  $+80^\circ\text{C}$  для ламп потужністю 46 та 55 Вт та до  $+55^\circ\text{C}$  для ламп потужністю 36, 45 та 65 Вт, що не перевищує допустиму температуру  $+80^\circ\text{C}$  (рис. 18). Підвищення температури вбудованого баласту КЛЛ при використанні лампи в СП для зовнішнього освітлення зумовлено, головним чином тим, що корпус світильника істотно обмежує конвективне охолодження лампи. Із отриманих результатів слідує, що немає прямої залежності температури в корпусі ЕПРА від номінальної потужності КЛЛ. Температура ЕПРА залежить від конструктивного виконання корпусу (кількості

та величини вентиляційних каналів, теплопровідності матеріалу з якого виготовлено корпус і т.п.) та елементної бази, з якої складається ЕПРА.

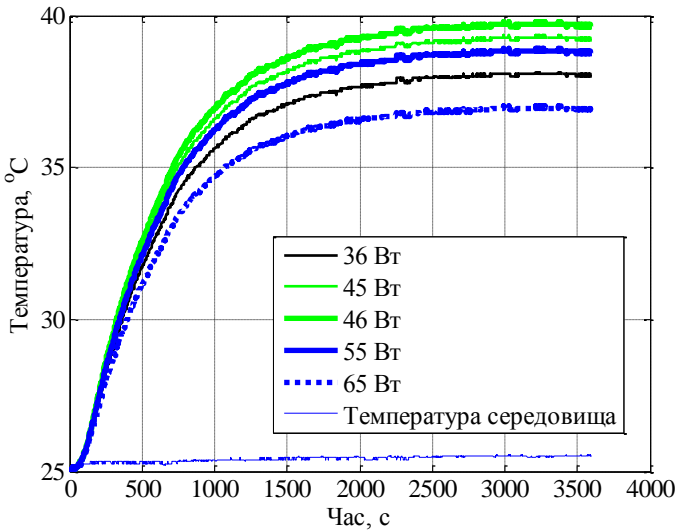


Рис. 17. Температура в корпусі ЕПРА КЛЛ при температурі навколишнього середовища +25 °С

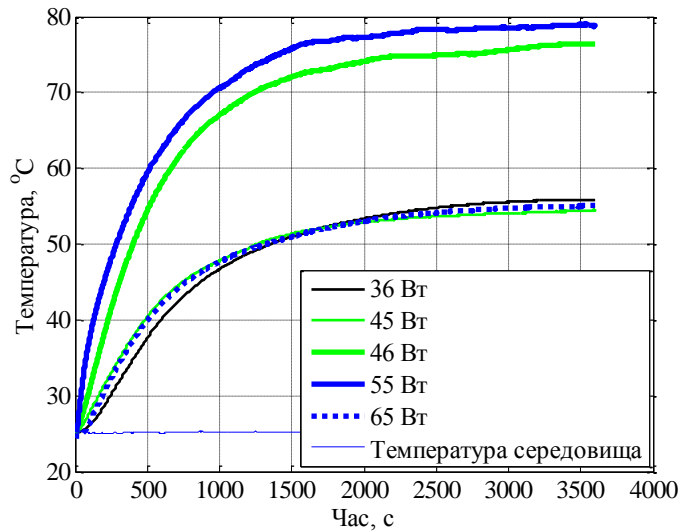


Рис. 18. Температура в корпусі ЕПРА при розташуванні КЛЛ в СП закритого типу при температурі навколишнього середовища +25 °С

При дослідженні світлотехнічних характеристик КЛЛ отримано залежність світлового потоку від температури навколишнього середовища (рис. 19).

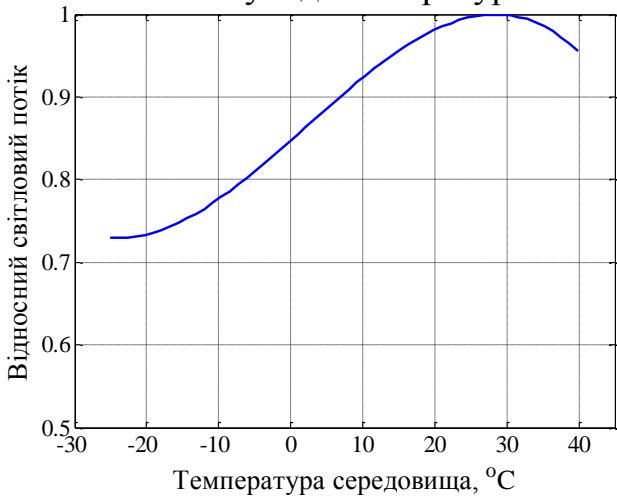


Рис. 19. Залежність світлового потоку КЛЛ від температури навколишнього середовища

Таким чином при зміні температури навколишнього середовища від -25 °С до +25 °С температура в СП із КЛЛ змінюється в діапазоні від +10 до +40 °С, світловий потік змінюється в діапазоні від 0,92 до 1 відносно номінального.

У п'ятому розділі проведено дослідження впливу ОУ зі СП із КЛЛ на показники якості електричної енергії та похибку її обліку. Дослідження проводилися на установці, яка складалася із трансформатора, що служив гальванічною розв'язкою між мережею живлення та навантаженням, у вторинну обмотку якого під'єднувалися лічильник активної електроенергії, КЛЛ та цифровий осцилограф Hantek 6022BE. Запис осцилограм проводився за допомогою персонального комп'ютера.

На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що амплітудні значення вищих гармонік струму живлення КЛЛ перевищують нормовані значення у 3 – 5 разів (рис. 20). Це зумовлено тим, що досліджувані зразки КЛЛ мали в схемі ЕПРА лише пасивний коректор коефіцієнта потужності.

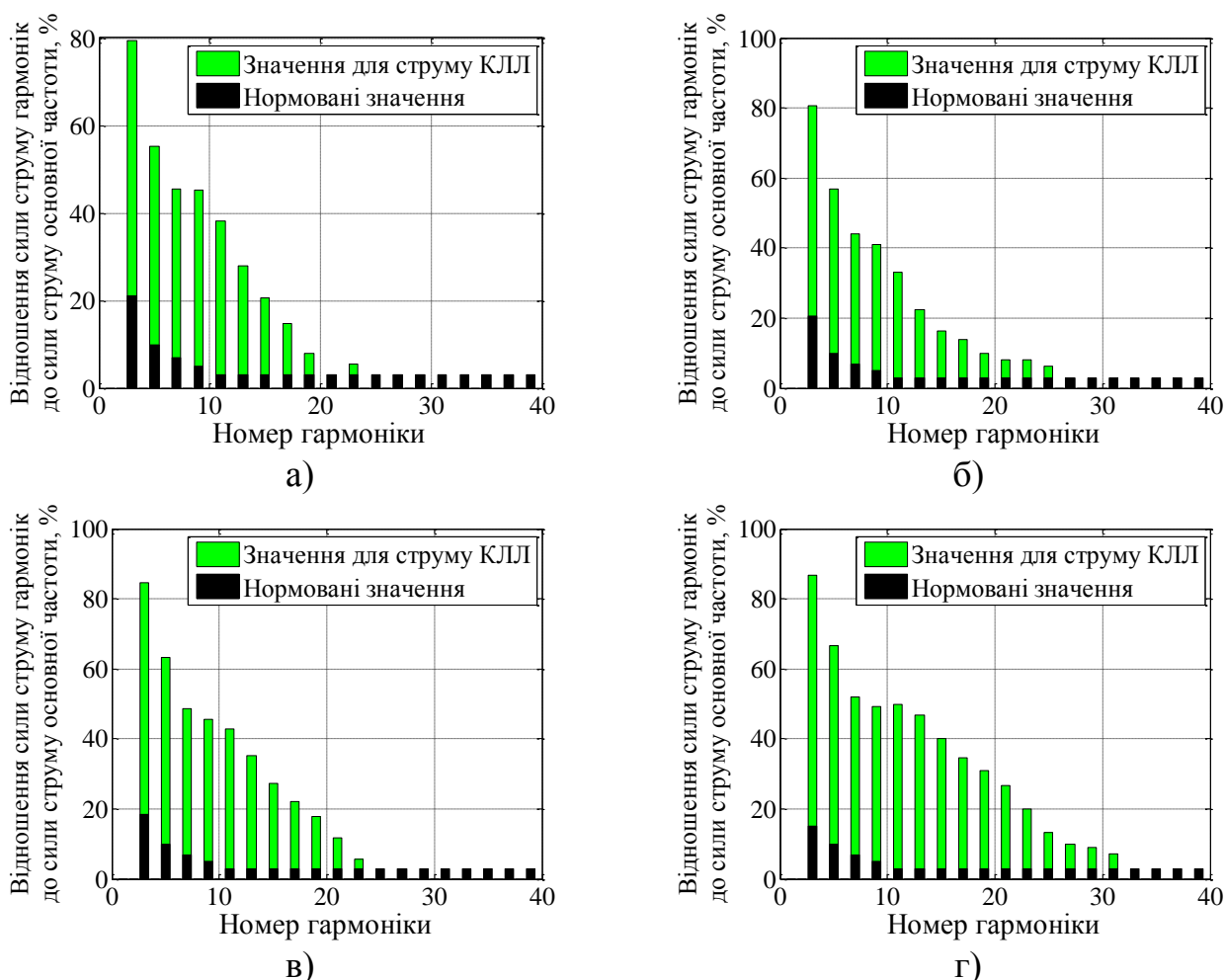


Рис. 20. Відношення сили струму гармонік до сили струму основної частоти в порівнянні із нормованими значеннями для КЛЛ а) Realux 55 Вт, б) Maxsus 55 Вт, в) Global 46 Вт, г) Realux 36 Вт

Проведено розрахунок коефіцієнта потужності  $PF$  КЛЛ:

$$PF = \frac{P_0}{S} = \frac{I_{1m} \cos \varphi_1}{\sqrt{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2 + \dots + I_{km}^2}}, \quad (17)$$

де  $I_{km}$  – амплітудне значення  $k$ -ої гармоніки струму.

Встановлено, що при включенні в коло двох і більше КЛЛ із різними схемами ЕПРА спостерігається тенденція до зниження значень амплітуди вищих гармонік та зростання коефіцієнта  $PF$ . Це можна пояснити відмінністю фазових спектрів струму живлення досліджуваних КЛЛ.

Проведено дослідження впливу  $PF$  на значення відносних похибок індукційного і електронного лічильників. При цьому визначення відносної похибки лічильників при обліку спожитої енергії КЛЛ полягало у порівнянні їх показів із розрахованими значеннями згідно осцилограм струму та напруги. На рис. 21, 22 приведено гістограми залежності похибки індукційного та електронного лічильників від коефіцієнта потужності.



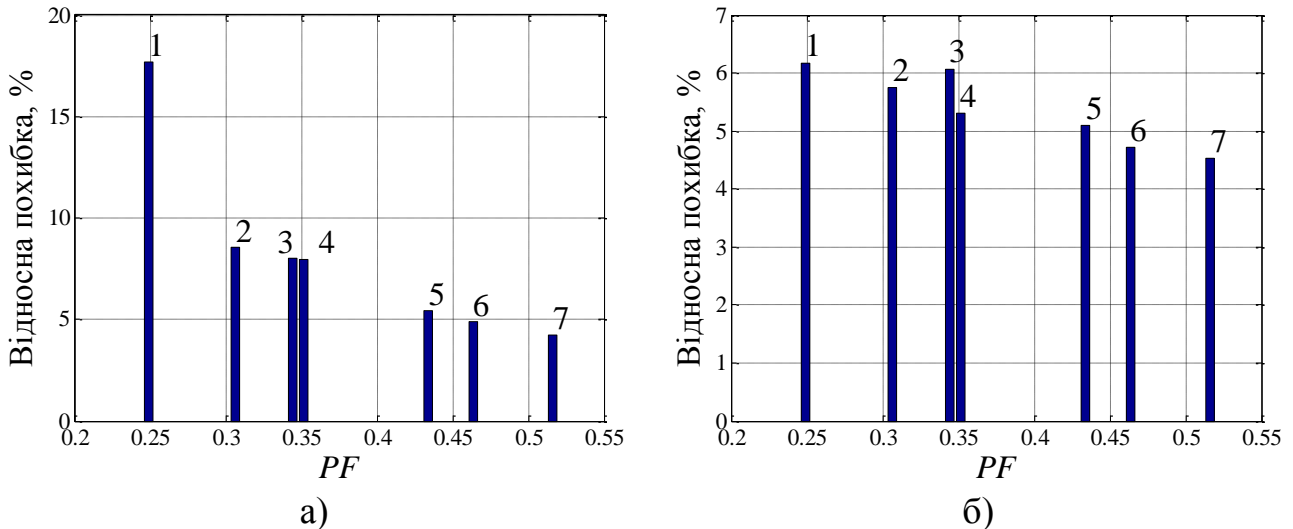


Рис. 21. Гістограма залежності похибки а) індукційного лічильника, б) електронного лічильника від  $PF$  при обліку спожитої електроенергії КЛЛ: 1 – Realux 36 Вт; 2 – Global 46 Вт; 3 – Maxsus 55 Вт; 4 – Realux 55 Вт; 5 – Maxsus 55 Вт та Realux 55 Вт; 6 – Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт, Realux 36 Вт; 7 – Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт, Realux 36 Вт та Global 46 Вт

Із аналізу представлених залежностей встановлено, що похибка електронного лічильника активної електричної енергії в середньому в 2,5 рази менша похибки індукційного лічильника активної електричної енергії. При зростанні коефіцієнта потужності похибка лічильників зменшується, але залишається більшою за допустиму на 3 та 4 % для електронного та індукційного лічильників, відповідно. Таким чином, при використанні КЛЛ, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику, покази лічильників є завищеними і споживач переплачує за використану електроенергію.

## ВИСНОВКИ

1. Для СП зовнішнього освітлення ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У та ЖКУ, РКУ Helios 21 проведено дослідження світлотехнічних параметрів із нетиповими для них ДС та встановлено, що при використанні КЛЛ в даних СП їх ККД зменшується на 14...17 %, внаслідок екранування світлового потоку поверхнею світного тіла.

2. Розроблено математичну модель для розрахунку фотометричного тіла СП вуличного освітлення, що забезпечує необхідні нормативні показники освітлення поверхні дорожнього покриття.

3. Розроблено методику розрахунку СП для зовнішнього освітлення із КЛЛ, яка дозволяє враховувати геометричні розміри ДС та на її основі розраховано відбивач СП із КЛЛ Realux 55 Вт, який спрямовує світловий потік повз поверхню світного тіла, за рахунок чого ККД світильника зріс на 26 %.

4. Проведено аналіз світлотехнічних параметрів СП для вуличного освітлення із КЛЛ при зміні геометричних розмірів її світного тіла. Встановлено зв'язок між допустимими розмірами світного тіла КЛЛ, її потужністю та світлотехнічними параметрами СП.

5. Побудовано математичну модель освітлення для різних категорій вулиць, яка дозволяє визначати направленість та розташування СП залежно від нормативних вимог. На її підставі проведено розрахунок якісних та кількісних показників освітлення дорожнього покриття при використанні СП із КЛЛ Realux 55 Вт. Встановлено, що максимальна допустима відстань між опорами для категорій вулиць М4 та М5 складає 37 м, а для категорії М3 – 33 м, найкращий кут нахилу оптичної осі СП до вертикалі складає  $31^\circ$ .

6. На основі результатів експериментальних досліджень теплового режиму КЛЛ встановлено, що температура в корпусі ЕПРА, при температурі навколишнього середовища  $+25^\circ\text{C}$ , не перевищує  $+40^\circ\text{C}$  для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт. Час виходу на усталений температурний режим складає не більше 40 хв. При розташуванні КЛЛ в СП для зовнішнього освітлення температура в корпусі ЕПРА зростає до  $+80^\circ\text{C}$ , що відповідає допустимій робочій температурі.

7. Проведено дослідження впливу КЛЛ на показники якості електроенергії. Встановлено, що у КЛЛ, які присутні на ринку України, амплітудні значення вищих гармонік перевищують нормовані у 3-5 разів. Це зумовлено тим, в схемах ЕПРА використовується лише пасивний коректор коефіцієнта потужності.

8. Удосконалено методику визначення відносної похибки індукційних та електронних лічильників та проведено аналіз впливу гармонійного складу струму КЛЛ на її величину. Встановлено, що похибки індукційного та електронного лічильників при обліку електроенергії в колах із КЛЛ перевищують максимально допустиму похибку на 3 та 4 % відповідно.

### ***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Andriychuk V. The effect of energy-efficient light sources on the quality of electricity / V. Andriychuk, N. Lipovetsky, M. Nakonechny, S. Potalitsyn // EUREKA: Physical Sciences and Engineering. – Tallinn – 2016. nr 1. – P. 38-48.

2. Андрійчук В.А. Аналіз систем зовнішнього освітлення та шляхів підвищення їх ефективності / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2012. – Том 68. – №4. – С.168-175. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

3. Поталіцин С. Ю. Світлотехнічні системи зовнішнього освітлення та аналіз їх енергетичної ефективності / С.Ю. Поталіцин // Світлотехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 49-57.

4. Андрійчук В.А. Аналіз енергетичної ефективності установок зовнішнього освітлення / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Комунальне господарство міст. – 2015. – №1(118). – С. 7-11.

5. Андрійчук В.А. Моделювання світлового приладу з неточковим джерелом світла / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2014. – Том 73. – №1. – С 201-208. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

6. Костик Л.М. Дослідження енергетичної ефективності світлових приладів для зовнішнього освітлення з різними джерелами світла / Л.М. Костик, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2014. – Том 76. – №4. – С. 173-181. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

7. Костик Л.М. Світлотехнічний розрахунок світлових приладів із джерелами світла заданих геометричних розмірів / Л.М. Костик, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2015. – Том 79. – №3. – С. 165-173. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

8. Андрійчук В.А. Фотометрія зовнішнього освітлення / В.А. Андрійчук, Я.М. Осадца, С.Ю. Поталіцин // Світлолюкс. – 2011. – №5 – С. 58-62.

9. Андрійчук В.А. Моделювання світлового поля, створеного компактною люмінесцентною лампою / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Світлолюкс. – 2012. – №4. – С. 53-55.

10. Андрійчук В.А. Особливості організації освітлювальних систем в умовах міського господарства та шляхи підвищення їх ефективності / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Галицький економічний вісник. – 2013. – №2(41). – С. 55-62. – (загальні проблеми економіки та суб'єктів господарювання).

### ***Опубліковані праці апробаційного характеру:***

1. Комп'ютерне проектування світлових приладів для систем зовнішнього освітлення з використанням енергозберігаючих джерел світла: матеріали XV наук.-техн. конф., (м. Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2011 р. – 159 с.

2. Розрахунок світлового поля неточкових джерел світла: матеріали IV Міжнародної наук.-техн. конф. [«Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи»], (м. Тернопіль, 24-26 квітня 2012 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2012 р. – 26 с.

3. Розрахунок світлового приладу з врахуванням геометричних розмірів джерела світла: матеріали V Міжнародної наук.-техн. конф. [«Современные тенденции развития светотехники»], (Харків, 15-16 травня 2013 р.) / М-во освіти і науки України, Харківський нац. ун-т міського господарства ім. А.Н. Бекетова. – Х.: ХНУМГ ім. А.Н. Бекетова, 2013. – 46 с.

4. Дослідження електромагнітної сумісності компактних люмінесцентних та світлодіодних ламп: матеріали XVII наук. конф., (Тернопіль, 20-21 листопада 2013 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2013 р. – 48 с.

5. Світлотехнічні параметри світлових приладів при прямій заміні джерел світла: тези доповідей V Міжнародної наук.-техн. конф. [«Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці МЕЕС 14»], (Київ, 1-3 жовтня 2014 р.) Національний авіаційний ун-т – К.: НАУ, 2014 р.

6. Розробка методики оцінки енергетичної ефективності світлових приладів з заданими геометричними розмірами джерела світла: матеріали XVIII наук. конф., (м. Тернопіль, 29-30 жовтня 2014 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2014 р. – 150 с.

## АНОТАЦІЯ

**Поталіцин С.Ю. Розробка науково-технічних основ впровадження компактних люмінесцентних ламп в системи зовнішнього освітлення. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2016.

Дисертація присвячена проблемі енергозбереження в зовнішньому освітленні за рахунок використання СП із КЛЛ. Розроблено методику розрахунку світлового приладу із заданими розмірами світлого тіла джерела світла та на її основі спроектовано світловий прилад з КЛЛ. Побудовано модель освітлення для різних категорій вулиць і на її основі проведено розрахунки якісних та кількісних показників установки вуличного освітлення та розроблено рекомендації для практичного впровадження КЛЛ в системи зовнішнього освітлення. Проведено експериментальні дослідження характеристик компактних люмінесцентних ламп при зміні температури навколишнього середовища. Проведено дослідження показників якості електричної енергії в системах зовнішнього освітлення із компактними люмінесцентними лампами та їх вплив на відносну похибку індукційного та електронного приладів обліку.

**Ключові слова:** компактна люмінесцентна лампа, зовнішнє освітлення, світловий прилад, оптичний розрахунок, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, енергетична ефективність.

## АННОТАЦИЯ

**Поталицын С.Ю. Разработка научно-технических основ внедрения компактных люминесцентных ламп в системы внешнего освещения. – Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – светотехника и источники света. Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2016.

Диссертация посвящена проблеме энергосбережения в системах внешнего освещения периферийных районов городов и сельской местности за счёт использования световых приборов с компактными люминесцентными лампами.

Использование в СП для внешнего освещения типа ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У и ЖКУ, РКУ Helios 21 нетипичных источников света в том числе и КЛЛ снижает их ККД на 14...17 %.

В работе проведено моделирование светового поля КЛЛ, в котором учтены геометрические размеры светового тела источника, что позволило увеличить точность полученных результатов на 40...60 %.

Предложена математическая модель расчёта оптической системы СП с источником света заданных геометрических размеров, в которой учтено экранирующее действие светового потока источником света. Разработана методика и алгоритм расчёта СП с компактной люминесцентно лампой.

Разработана модель освещения улиц разных категорий, на основе которой проведен расчет светотехнических параметров осветительной установки со световыми приборами с лампами Realux 55 Вт. Показано, что для достижения нормативных показателей освещения для категории улиц М4 и М5 максимальное расстояние между СП – 37 м, а для категории М3 – 33 м. Оптимальный угол наклона оптической оси СП относительно вертикали – 31°.

Представлены результаты исследования влияния температуры окружающей среды на светотехнические параметры как отдельно взятой КЛЛ, так и помещённой в световом приборе. Установлено, что для ламп мощностью от 36 до 65 Вт при изменении температуры внешней среды от -25 °С до +25 °С температура ЭПРА не превышает допустимую температуру +80 °С, при этом световой поток изменяется от 0,92 до 1,0 относительно номинального значения.

Проведены исследования влияния ОУ с СП с КЛЛ на показатели качества электрической энергии и относительную погрешность её учета. Показано, что амплитудные значения высших гармоник тока ламп превышают нормативные значения в 3 – 5 раз, что вызвано недостаточным уровнем коррекции коэффициента мощности ЭПРА КЛЛ. Это приводит к превышению относительной погрешности учёта электрической энергии на 3 – 4 %.

**Ключевые слова:** компактная люминесцентная лампа, наружное освещение, световой прибор, оптический расчет, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, энергетическая эффективность.

## ANNOTATION

**Potalitsyn. S. Yu. Development of scientific and technological bases of compact fluorescent lamps introduction into outdoor lighting systems. - Manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.07 - Lighting Engineering and Light Sources. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2016.

The thesis is dedicated to the problem of energy efficiency in outdoor lighting through the use of a fixture with a compact fluorescent lamp. The development of calculation methodology of a fixture with the target size of the luminous body of the light source has been done and on its basis a fixture with a compact fluorescent lamp has been projected. A lighting model for different types of streets has been constructed and on its basis calculations of qualitative and quantitative indicators of street lighting installments have been done as well as recommendations for the practical implementation of compact fluorescent lamps into outdoor lighting systems have been developed. Experimental studies of characteristics of compact fluorescent lamps during the change of the temperature of the environment have been done. The calculation of the thermal regime of a closed-type fixture with a compact fluorescent lamp Realux 55 W has been conducted. Research of quality indices of electricity in outdoor lighting systems with compact fluorescent lamps has been done as well as their impact on relative error of induction and electronic metering instruments.

**Key words:** compact fluorescent lamp, outdoor lighting, fixture, optical calculation, coefficient of performance, power factor, energy efficiency.