

УДК 628.94.001.57

**В. Андрійчук, докт. техн. наук; С. Поталіцин**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **МОДЕЛЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПРИЛАДУ З НЕТОЧКОВИМ ДЖЕРЕЛОМ СВІТЛА**

**Резюме.** За умови високих вимог до якості освітлення та енергозбереження, установки зовнішнього освітлення, для забезпечення цих показників необхідно переоснастити високоефективними світловими приладами (СП) із енергозберігаючими джерелами світла (ДС). Використання світильників на основі таких ДС вимагає нових підходів до проектування СП. На відміну від джерел світла, представлених у вигляді точкового або лінійного світлого тіла, при розрахунку даних світлових приладів необхідно враховувати геометричні розміри випромінювача. Це дозволить покращити світлові характеристики спроектованих світильників.

Розроблено програму для побудови світлорозподілу джерела світла із заданими геометричними параметрами в середовищі MatLab.

Побудову поверхні відбивача здійснено методом трансформації фотометричного тіла ДС у фотометричне тіло світлового приладу.

**Ключові слова:** світловий прилад, джерело світла, світловий вектор, сила світла, фотометричне тіло.

**V. Andriychuk; S. Potalitcyn**

## **MODELING OF LIGHT DEVICE WITH NON-POINT LIGHT SOURCE**

**Summary.** The usage of energy-efficient light sources (LS) is offered for providing high quality illumination and energy efficiency of outdoor lighting installations. Exploitation of the illuminators basing on such LS requires new approaches in the light devices (LD) designing. On the contrary to the light sources presented as spot or linear luminous body the geometric size of the radiator calculating light devices data are taken into account. This allowed us to improve the light illuminators specifications.

Two methods for light devices calculation are used: direct calculation and an inverse calculation. Most LD calculating methods do not take into account light distribution dissymmetry of the light sources. This reduces accuracy of the illuminator reflector calculations. The task of this paper is to develop calculation method for light devices with set geometric parameters and to create automatic calculating software of light devices with set initial parameters basing on the MatLab package.

The photometrical body of specified LS at the first stage of our work was constructed. The light source as equally bright cylinder, which was determined by the equations, which make possible to characterize emitter position in space was presented. Light vector was the basic value measure, which characterized emitter luminous field. Emitter calculating was required to determine the distribution of the light source luminous intensity. The software was created basing on the MatLab package for calculating luminous intensity curve of light source. The photometrical body and luminous intensity curves were constructed in the meridian and equatorial planes of fluorescent lamp with emitting surface brightness  $L = 2000 \text{ cd / m}^2$ , diameter  $D = 0.02 \text{ m}$  and length  $h = 0.1 \text{ m}$ .

- Calculation of the light device reflector with non-spot light source is:
- - to determine the laws of the luminous intensity distribution from light sources;
- - to find the distribution of the incident and reflected luminous flux;
- - to design a form of reflecting surface, which provides the transformation of photometric light source body into specified photometric body.

**Key words:** light device, light source, light vector, luminous intensity, photometric body.

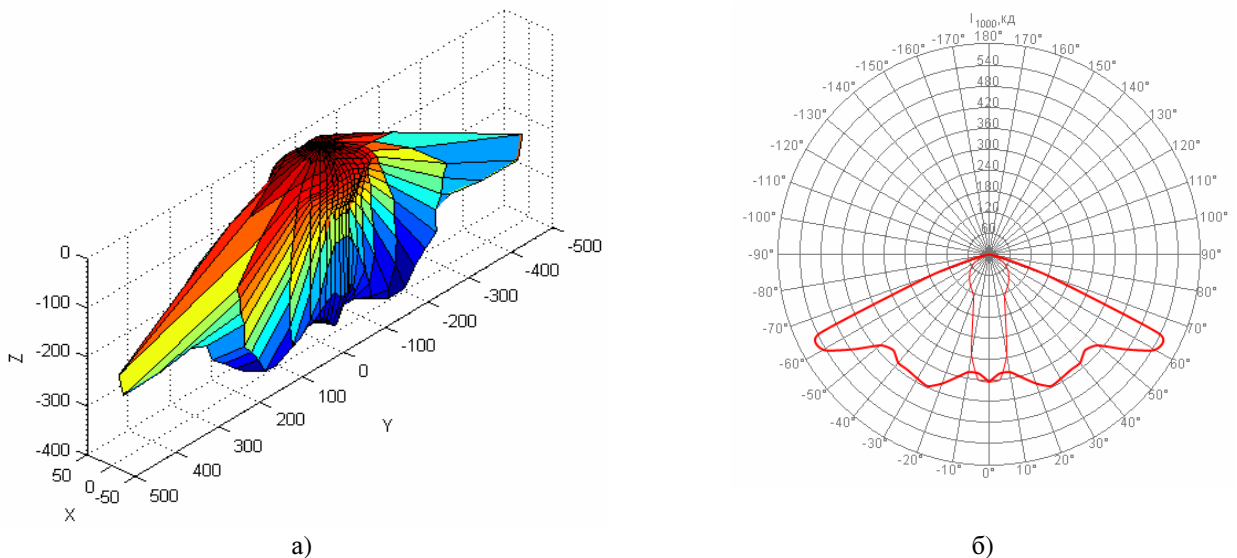
**Постановка проблеми.** Більшість методик розрахунку СП (наприклад, метод балансу падаючого і відбитого світлових потоків, де джерело світла вважається точковим), не враховують несиметричність світлорозподілу самих джерел світла, через що знижується точність у розрахунку відбивача світильника. Асиметрія фотометричного тіла ДС зумовлена специфікою геометричних розмірів випромінювачів, прикладом яких є компактні люмінесцентні лампи або світлодіодні матриці. Оскільки вихідними результатами при проектуванні СП є розподіл сили світла світильника, який задається кривими сили світла (КСС) у різних перерізах фотометричного тіла, врахування асиметричності світлорозподілу ДС дозволить збільшити точність розрахунків, що, в свою чергу, підвищить енергетичну ефективність освітлювальних установок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для розрахунку світлових приладів застосовують два типи методів: прямий розрахунок (за заданими параметрами джерела і відбивача розраховують криву сили світла, освітленість та ін.) та обернений розрахунок (розраховують параметри відбивача за заданою кривою сили світла і параметрами джерела) [1]. До першого типу належать методи елементарних відображень, та прямого і зворотного ходу променів [2], до другого – методи одночасного створення множинних поверхонь (Simultaneous multiple surfaces) [3] та підгонки поверхонь (Tailoring surfaces) [4].

**Мета роботи.** Створення математичної моделі світлового приладу з неточковим джерелом світла та розроблення методики розрахунку його параметрів.

**Постановка задачі.** Розробити методику розрахунку СП із джерелами світла з заданими геометричними параметрами та створити програмне забезпечення автоматизованого розрахунку СП у середовищі MatLab при заданих початкових параметрах.

**Виклад основного матеріалу.** Світлотехнічні характеристики СП задаються параметрами джерела світла та відбиваючого елемента (рис.1).



**Рисунок 1.** Характеристики світлового розподілу СП:  
а) фотометричне тіло  $J = J(\theta, \varphi)$ ; б) поперечна і поздовжня КСС

**Figure 1.** Luminous distribution characteristics of photometric device:  
a) photometric body  $J = J(\theta, \varphi)$ ; b) transverse and longitudinal of luminous intensity curve

На першому етапі моделювання ставилася задача побудови фотометричного тіла заданого ДС. Джерело світла представляли рівнояскравим циліндром (рис.2), що

задається параметричними рівняннями, які дозволяють охарактеризувати положення випромінювача в просторі:

$$\begin{aligned} x &= h \\ y &= R \sin(u) \\ z &= R \cos(u), \end{aligned} \tag{1}$$

де  $R$  – радіус циліндра;  
 $h$  – довжина циліндра.

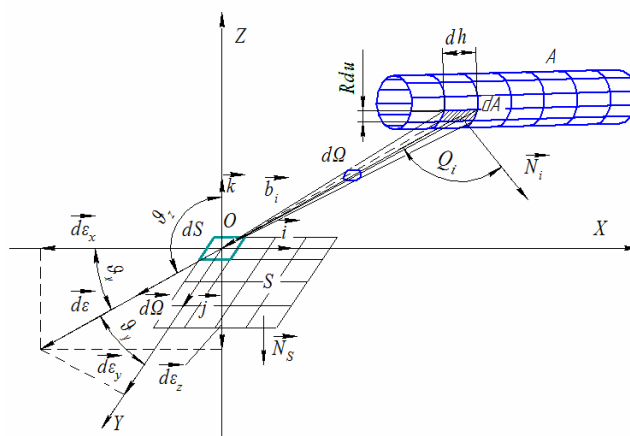


Рисунок 2. Геометричне представлення системи «джерело світла – освітлювальна площина»

Figure 2. Geometric presentation of «light sources – lighting area» system»

Основна величина, що характеризує світлове поле випромінювача, є світловий вектор. Для вирішення поставленого завдання необхідно провести його розрахунок у кожній точці простору навколо випромінювача. Запишемо рівняння, що визначають його ортогональні проекції [5]:

$$\begin{aligned} d\epsilon_x &= dE_N \cos(\vartheta_x) \\ d\epsilon_y &= dE_N \cos(\vartheta_y) \\ d\epsilon_z &= dE_N \cos(\vartheta_z), \end{aligned} \tag{2}$$

де  $dE_N$  – максимальна освітленість елемента  $dS$  площини  $S$ , що створюється елементарною ділянкою  $dA$  випромінюючої поверхні  $A$ ;

$\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$  – направляючі кути між світловим вектором та відповідними осями координат.

Освітленість  $dE_N$  визначаємо за формулою

$$dE_N = L \left| d\vec{\Omega} \right|, \tag{3}$$

де  $L$  – яскравість випромінювача;

$d\vec{\Omega}$  – вектор елементарного тілесного кута  $d\Omega$ , під яким видно елементарну ділянку випромінювача  $dA$  з точки  $O$ .

Модуль вектора тілесного кута  $d\bar{\Omega}$  дорівнює тілесному куту  $d\Omega$ , а напрямок цього вектора співпадає з віссю тілесного кута й орієнтований по напрямку випромінювання:

$$d\bar{\Omega} = \bar{b}_i^0 \frac{(\bar{N}_i \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|^3} dA, \quad (4)$$

де  $\bar{b}_i^0$  – одиничний вектор напрямку випромінювання;

$\bar{N}_i$  – одиничний вектор, нормальний до  $dA$ ;

$\bar{b}_i$  – вектор, направлений від елементарної ділянки випромінювача  $dA$  до площадки  $dS$  по напрямку випромінювання.

Направляючі косинуси світлового вектора дорівнюють

$$\cos(\vartheta_x) = \frac{(\bar{i} \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|}, \cos(\vartheta_y) = \frac{(\bar{j} \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|}, \cos(\vartheta_z) = \frac{(\bar{k} \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|}, \quad (5)$$

де  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  – орти осей координат  $X, Y, Z$  відповідно.

Площу елементарної ділянки  $dA$  випромінювача  $A$  визначаємо рівнянням

$$dA = R dudh. \quad (6)$$

Враховуючи вирази (3),(4),(5) і (6), рівняння (2) набуде вигляду

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= LR \frac{(\bar{N}_i \cdot \bar{b}_i)(\bar{i} \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|^4} dudh \\ d\varepsilon_y &= LR \frac{(\bar{N}_i \cdot \bar{b}_i)(\bar{j} \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|^4} dudh \\ d\varepsilon_z &= LR \frac{(\bar{N}_i \cdot \bar{b}_i)(\bar{k} \cdot \bar{b}_i)}{|\bar{b}_i|^4} dudh. \end{aligned} \quad (7)$$

Тоді ортогональні проекції світлового вектора від випромінюючої поверхні  $A$  в досліджуваній точці світлового поля дорівнюють

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= LR \int_{h_1}^{h_2} \int_0^{2\pi} \frac{(\vec{N}_i \cdot \vec{b}_i)(\vec{i} \cdot \vec{b}_i)}{|\vec{b}_i|^4} dudh, \\ \varepsilon_y &= LR \int_{h_1}^{h_2} \int_0^{2\pi} \frac{(\vec{N}_i \cdot \vec{b}_i)(\vec{j} \cdot \vec{b}_i)}{|\vec{b}_i|^4} dudh, \\ \varepsilon_z &= LR \int_{h_1}^{h_2} \int_0^{2\pi} \frac{(\vec{N}_i \cdot \vec{b}_i)(\vec{k} \cdot \vec{b}_i)}{|\vec{b}_i|^4} dudh. \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (8) визначають ортогональні проекції світлового вектора від усієї поверхні циліндричного джерела світла. В реальних умовах освітленість буде створюватися тільки випромінюванням зовнішньої частини поверхні циліндра, яка направлена до досліджуваної ділянки  $dS$ . Тому кут  $Q_i$  між нормаллю  $\vec{N}_i$  до випромінюючої елементарної ділянки  $dA$  та вектором  $\vec{b}_i$  буде змінюватися в проміжку  $-\pi/2 < Q_i < \pi/2$ .

Визначимо розподіл сили світла  $I = I(\theta, \varphi)$  від джерела світла заданої форми та розмірів.

Освітленість  $dE$  елементарної площадки  $dS$  дорівнює

$$dE = \frac{(\vec{N}_s \cdot \vec{b}_i)}{|\vec{b}_i|^3} dI, \quad (9)$$

де  $dI$  – сила світла у напрямку до  $dS$  від елементарної ділянки  $dA$ .

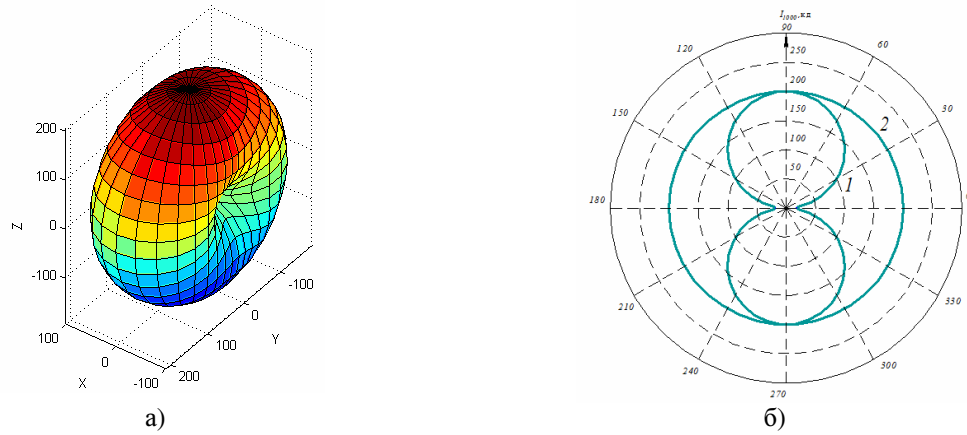
Оскільки

$$|d\vec{\varepsilon}| = \frac{dE}{(\vec{N}_s \cdot \vec{b}_i^0)}, \quad (10)$$

Тоді

$$dI = LR(\vec{N}_i \cdot \vec{b}_i^0) dudh. \quad (11)$$

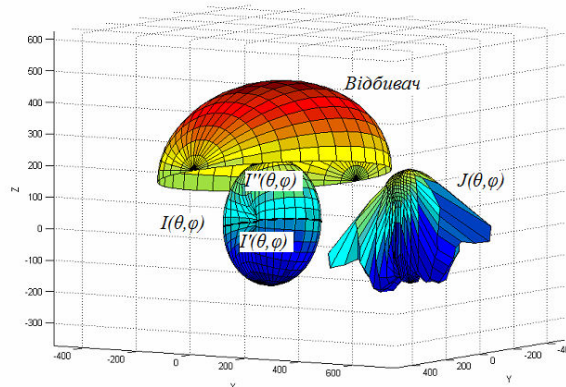
Для розрахунку КСС джерела світла було розроблено програмне забезпечення в середовищі MatLab [6]. На рис.3 наведено фотометричне тіло та криві сили світла в екваторіальній та меридіальній площинах люмінесцентної лампи, яскравість випромінюючої поверхні якої  $L = 2000 \text{кд} / \text{м}^2$ , діаметром  $D = 0.02 \text{м}$  і довжиною  $h = 0.1 \text{м}$ .



**Рисунок 3.** Характеристики світлового розподілу ДС:  
а) фотометричне тіло  $I = I(\theta, \varphi)$ ; б) поперечна (1) і повздожня (2) КСС

**Figure 3.** Luminous distribution characteristic of LS:  
a) photometric body  $I = I(\theta, \varphi)$ ; b) transverse (1) and longitudinal (2) luminous intensity curve

Наступний етап моделювання полягає у трансформуванні фотометричного тіла від джерела світла  $I = I(\theta, \varphi)$  у фотометричне тіло світлового приладу  $J = J(\theta, \varphi)$  (рис.4).



**Рисунок 4.** Трансформування фотометричного тіла джерела світла  $I = I(\theta, \varphi)$  у фотометричне тіло світлового приладу  $J = J(\theta, \varphi)$

**Figure 4.** Transformation of photometric body of light source  $I = I(\theta, \varphi)$  into photometric body of photometric device  $J = J(\theta, \varphi)$

Встановлюємо послідовність перетворення фотометричних тіл. Фотометричне тіло  $I = I(\theta, \varphi)$  визначається двома світловими потоками:

1. Світловий потік  $\Phi'$ , який безпосередньо поширюється від джерела світла в нижню частину простору та описується фотометричним тілом  $I' = I'(\theta, \varphi)$ :

$$\Phi' = \iint_{I'(\theta, \varphi)} \sin(\theta) d\theta d\varphi. \tag{12}$$

2. Світловий потік  $\Phi''$  падаючий на дзеркальну поверхню відбивача СП, який описується фотометричним тілом  $I'' = I''(\theta, \varphi)$ :

$$\Phi'' = \iint_{I'(\theta, \varphi)} \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (13)$$

Вибравши деякий елементарний світловий потік  $d^2\Phi''$ , перенаправляємо його у напрямку світлового потоку  $d^2\Phi'$  так, щоб

$$d^2\Phi = d^2\Phi' + d^2\Phi'', \quad (14)$$

де

$$d^2\Phi' = I'(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi, \quad (15)$$

$$d^2\Phi'' = I''(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi, \quad (16)$$

$d^2\Phi$  – елементарний світловий потік від світлового приладу, який дорівнює

$$d^2\Phi = J(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (17)$$

Тоді

$$J(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = I'(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi + I''(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (18)$$

Форма поверхні відбивача світлового приладу буде визначатися кутовими коефіцієнтами нормального вектора  $\vec{n}_i$  до цієї поверхні в точці падіння сили світла  $I_i$ , яку необхідно відбити у напрямку вектора  $\vec{J}_i$ . Координати вектора  $\vec{n}_i$  дорівнюють

$$\vec{n}_i = \left( \frac{-I_i^X + J_i^X}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi_i}}; \frac{-I_i^Y + J_i^Y}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi_i}}; \frac{-I_i^Z + J_i^Z}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi_i}} \right), \quad (19)$$

де  $I_i^X, I_i^Y, I_i^Z$  – кутові коефіцієнти вектора  $\vec{I}_i$ ;

$J_i^X, J_i^Y, J_i^Z$  – кутові коефіцієнти відбитого вектора  $\vec{J}_i$ ;

$\psi_i$  – кут між падаючою  $I_i$  та відбитою  $J_i$  силами світла.

**Висновки.** 1. Проведено аналіз методів розрахунку світлових приладів.

2. Розроблено програмне забезпечення для побудови світлорозподілу джерела світла з заданими геометричними параметрами із використанням програмних засобів MatLab. Даний алгоритм розрахунку враховує випромінювання тільки зовнішньої сторони від світлого тіла ДС.

3. Розраховано КСС в екваторіальній та меридіальній площинах люмінесцентної лампи, яскравість випромінюючої поверхні якої  $L = 2000 \text{кд} / \text{м}^2$ , діаметром  $D = 0.02 \text{м}$  і довжиною  $h = 0.1 \text{м}$ .

4. Принцип розрахунку поверхні відбивача світлового приладу полягає у трансформуванні фотометричного тіла джерела світла у фотометричне тіло світильника.

**Conclusions.** 1. Light device calculation methods were analyzed.

2. The software for determining of light source luminous distribution with specified geometric parameters were constructed basing on the MatLab package. This calculating algorithm takes into account outside emission of LS photic body.

3. The luminous intensity curves were calculated in the meridian and equatorial planes of fluorescent lamp with emitting surface brightness  $L = 2000\text{cd} / \text{m}^2$ , diameter  $D = 0.02\text{m}$  and length  $h = 0.1\text{m}$ .

4. Principle of the LS emitter surface calculating is the transformation of the light source photometric body into the illuminator photometric body.

**Список використаної літератури**

1. Трембач, В.В. Световые приборы [Текст] / В.В. Трембач. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 463 с.
2. Муханов, П.В. Принципы построения систем автоматизированного проектирования световых приборов: дис... канд. техн. наук: 05.09.07 / Павел Владимирович Муханов. – М., 2010. – 107 с. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/printsipy-postroeniya-sistem-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-svetovykh-priborov> ISSN 1990-5548 Електроніка та системи управління. 2012. №2(32) 143
3. Benítez J. C. SMS Design Method in 3D Geometry: Examples and Applications // Proc. of SPIE Vol. 5185 / Benítez, J.C. Miñano, J. Bien, R. Mohedano, J. Chaves, O. Dross, M. Hernández, J.L. Alvarez, W. Falicoff – 2003. – Режим доступа: <http://www.lpic.com/Papers/3DGeometry.pdf>
4. Ries H.R. Tailored edge-ray reflectors for illumination/H.R. Ries, R. Winston//J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 11, No. 4/April 1994. – Режим доступа: [http://www.optics.arizona.edu/koshel/Papers/JOSAA11.4\\_1260.pdf](http://www.optics.arizona.edu/koshel/Papers/JOSAA11.4_1260.pdf)
5. Мешков, В.В. Основы светотехники: учеб. пособие для вузов. Ч. 1 [Текст]/ В.В. Мешков. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1979. – 368 с.
6. Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 [Текст]/ И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

*Отримано 03.12.2013*