

Н. Гасвська, Я. Герій

*Тернопільський державний технічний університет імені
Івана Пулюя*

ФОТОМЕТРИЧНЕ ТІЛО В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ОПРОМІНЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З НЕСИМЕТРИЧНИМ СВІТЛОВИМ РОЗПОДІЛОМ

На основі експериментальних вимірювань побудовано фотометричні тіла опромінювальних пристроїв з несиметричним світловим розподілом. Запропоновано математичну модель ОП та розроблено програму розрахунку на комп'ютері опромінення довільної площини.

Світлотехнічний розрахунок опромінювальних установок (ОУ) за часту зводиться до визначення потужності джерел випромінювання (ДВ) в опромінювальному пристрої (ОП) по заданому параметру світлового поля (опромінення, об'ємна густина потоку випромінювання), або до визначення параметрів поля по заданому розташуванню ОП і відомій потужності ДВ.

У розрахунку опромінювальних установок (ОУ) з декількома опромінювальними пристроями (ОП) користуються просторовими кривими рівних значень відносного опромінення, побудованими в полярній системі координат [1,2]. Цей метод є громіздким і вимагає тривалої кропіткої праці. Крім того, точність такого розрахунку є невисокою, оскільки включає величини, які визначаються із графічного матеріалу. В зв'язку з широким впровадженням інформаційних технологій стало можливим не лише підвищити точність розрахунку, але і автоматизувати його. Для цього постає задача розробки методики і створення програмного забезпечення світлотехнічного розрахунку ОУ на ЕОМ [3-5].

Для розробки методики даного розрахунку ОУ на комп'ютері в першу чергу необхідно мати математичну модель опромінювального пристрою, в якій важлива роль відводиться світловому розподілу опромінювача. В даній роботі ставилась задача провести вимірювання розподілу світлового потоку декількох типових опромінювачів, побудувати їх фотометричні тіла, розробити математичну модель ОП, в якій би даний розподіл був би врахований, та запропонувати алгоритм світлотехнічного розрахунку на комп'ютері з врахуванням даної математичної моделі.

Випромінювальні елементи (джерела світла, світлові прилади) для яких співвідношення між їх розмірами і віддаллю до опромінювальної поверхні $\leq 20\%$ можна вважати точковими. Така умова виконується для ОУ, що використовуються в тепличних господарствах. При розрахунках опромінення довільно розташованої

елементарної поверхні dS від точкового ДВ користуються законом квадратів відстаней, який у векторній формі можна представити рівнянням:

$$E_c = \frac{I(\alpha) \cdot (\overline{AC} \cdot (-\vec{N}))}{|\overline{AC}|^3}, \quad (1)$$

де AC – вектор напрямлений від опромінювача, розташованого в точці A до вибраної точки світлового поля C , яку оточує елементарна поверхня dS ;

N – одиничний вектор нормалі до поверхні dS .

Світловий розподіл точкового джерела випромінювання найбільш повно описується фотометричним тілом, що являє собою поверхню утворену кінцями радіус-векторів сили випромінювання. У випадку круглосиметричного світлового розподілу сила випромінювання в будь-якому напрямку простору визначається кутом α , що відраховується від осі опромінювача. Для більшості світлових приладів з круглосиметричною діаграмою направленості світлового потоку $I(\alpha)$ задається у вигляді таблиці або графічно при зміні кута - $90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Світловий розподіл некруглосиметричних ОП задається залежністю сили випромінювання $I(\beta, \alpha)$ від кутів (β) в поперечній (екваторіальній) та (α) поздовжній (меридіальній) площинах і зображається графічно просторовим фотометричним тілом. При наявності двох площин симетрії у фотометричному тілі, азимутальний кут β задається в межах $0 \dots 90^\circ$, при одній площині симетрії — в межах $0 \dots 180^\circ$, при відсутності площини симетрії — $0 \dots 360^\circ$.

При світлотехнічних розрахунках ОУ для ОП з круглосиметричним фотометричним тілом виходили із експериментальної кривої світлового розподілу опромінювача, яку представляли аналітично. Аналітичний вираз $I(\alpha)$ отримувався за наступною схемою:

- за табличними експериментальними даними будувався графік $I(\alpha)$, який після цього оброблявся кубічним сплайном, що збільшувало число точок на графіку до заданого N ;
- за новими табличними даними, використовуючи метод апроксимації поліномом або рядом Фур'є, записувався аналітичний вираз $I(\alpha)$.

Згідно наведеної методики представимо $I(\alpha)$ у вигляді полінома:

$$I(\alpha) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n A_i \cdot \alpha^i, & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{cp} \\ 0, & \alpha > \alpha_{cp} \end{cases}, \quad (2)$$

де α_{cp} – граничний кут, для якого можна вважати $I(\alpha)=0$.

Кутовий розподіл сили випромінювання некруглосиметричного опромінювача $I(\beta, \alpha)$ отримувався експериментально на установці, схема якої показана на рис. 1. При цьому будь-який напрям вектора сили випромінювання задавався двома кутами: α — кутом повороту опромінювача відносно осі Е; β — кутом повороту опромінювача відносно осі F. Обидва кути змінювалися в межах $+90^\circ \dots -90^\circ$. Знак "+" брався тоді, коли поворот опромінювача відбувався за годинниковою стрілкою, якщо дивитися в сторону випромінювання ОП, а "-" — коли проти годинникової стрілки

Такі вимірювання були проведені для ряду світильників та широко-кутових прожекторів з кроком зміни кутів $\Delta\beta = 10^\circ$ і $\Delta\alpha = 5^\circ$. Результати експериментальних вимірювань подавалися у вигляді таблиць, в яких у відповідності до значень кутів β і α записувалися значення сили світла у заданому напрямку.

При складанні таблиць дотримувалися таких правил:

1) значення сили світла $I(\beta, \alpha)$ у табличних точках визначалися з однаковою похибкою, яка для даної гоніофотометричної установки дорівнювала 5%;

2) у таблиці подавалися лише ті значення сили світла, похибка кожного з яких не перевищувала 0.5 одиниці молодшого розряду експериментально отриманих величин.

Табличні дані служили основою для подальших світлотехнічних розрахунків на комп'ютері, згідно рівняння (1).

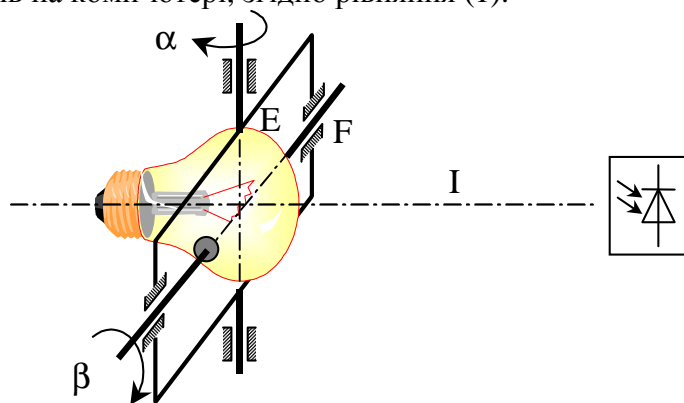


Рис.1. Схема гоніофотометричної установки для фотометрування світлових приладів прожекторного типу.

Для опромінювача з параболо-циліндричним відбивачем типу РСП-ВОТ-02, у фокусі якого розміщена лампа ДНаТ-400, вимірювання проводилися на іншому гоніофотометрі, схема якого подана на рис.2.

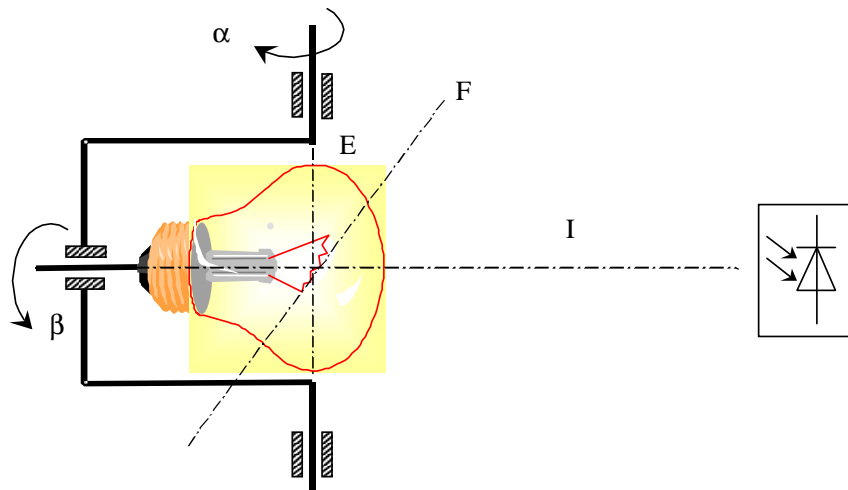


Рис.2. Схема гоніофотометра для фотометрування ОП з параболо-циліндричним відбивачем РСП-ВОТ-02 та лампою ДНаТ-400

Поворот ОП здійснювався навколо двох осей E і I. Азимутальний кут β змінювався при повороті навколо осі I а меридіальний α – навколо осі E. Як і в попередньому випадку ці кути мінялися від $+90^\circ$ до -90° і знак їх задавався аналогічно.

Результати експериментальних вимірювань подавалися у вигляді таблиць, де відповідно до значень кутів β і α записувалися значення сили випромінювання у заданому напрямі.

При складанні таблиць дотримувалися таких же правил, як і в попередньому випадку.

Табличні дані служили основою для подальших світлотехнічних розрахунків.

В результаті були отримані фотометричні тіла кожного із опромінювачів з певним типом джерела світла. Приклад фотометричного тіла для широко-кутового прожектора ЖО-01 з лампою ДНаТ-400 наведено на рис. 3. Такі ж фотометричні тіла були отримані і для ламп ДРИ-250-5, ДРИ-400-5.

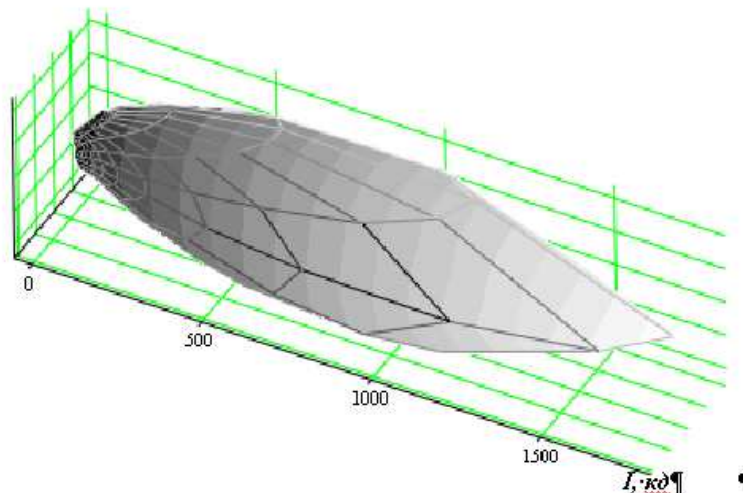


Рис.3. Фотометричне тіло ширококутового прожектора ЖО-01 з лампою ДНАТ-400, приведенне до світлового потоку 1000 лм

Приклад фотометричного тіла для тепличного світильника РСП-ВОТ-02 з лампою ДНАТ-400 подано на рис.4.

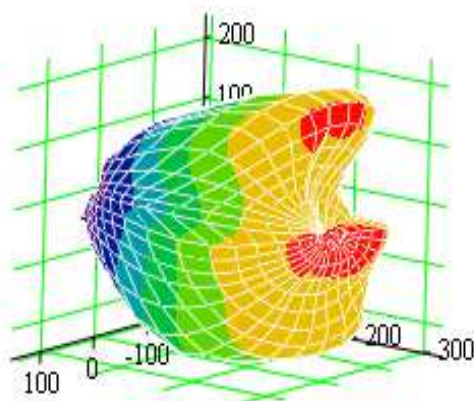


Рис.4. Фотометричне тіло опромінювача для теплиць РСП-ВОТ-02 з лампою ДНАТ-400, приведенне до світлового потоку 1000 лм.

При створенні математичної моделі опромінювального пристрою будемо виходити з того, що він складається з двох структурних елементів — джерела випромінювання та приймача. Геометрична схема такого ОП приведена на рис.5. Джерелом випромінювання в даному випадку є опромінювач, світловий розподіл якого виміряний експериментально і заданий фотометричним тілом. З кожним із них пов'яжемо свою систему координат: для джерела — $Ax_1Y_1Z_1$, для приймача — $Px_1Y_1Z_1$. Оскільки можлива зміна положення

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

джерела відносно приймача, то необхідно ввести ще одну систему координат $OXYZ$, пов'язану з земельною ділянкою теплиці, в якій будемо розглядати опромінювальну установку в цілому. Зв'язок між окремими системами координат можна записати аналітично.

Цінним в даній моделі є те, що система координат джерела випромінювання співпадає з системою координат гоніофотометра, на якому проводились вимірювання світлового розподілу опромінювача. Це дозволяє безпосередньо використати експериментальні дані, представлені у вигляді таблиць, при світлотехнічному розрахунку на комп'ютері.

Для проведення розрахунку опромінення елементарної ділянки dS у формулу (1) підставимо $I(\beta, \alpha)$ та координати векторів \overline{AC} і \overline{N} . Вектор \overline{AC} запишемо як суму векторів:

$$\overline{AC} = \overline{OP} + \overline{PC} - \overline{OA} \quad (3)$$

Вектори \overline{N} та кожен із складових \overline{AC} представлені в системі $OXYZ$.

Значення сили випромінювання $I(\beta, \alpha)$ в напрямку \overline{AC} задається кутами β і α . Куты β і α для вибраного напрямку в системі координат джерела можна записати через скалярний добуток векторів:

$$\beta = \arcsin \frac{(\overline{AC} \cdot \vec{e})}{|\overline{AC} - (\overline{AC} \cdot \vec{e}) \vec{e}|};$$
$$\alpha = \arcsin \frac{(\overline{AC} \cdot \vec{e}_f)}{|\overline{AC}|}. \quad (4)$$

При знаходженні сили випромінювання для кутів β і α , які не співпадають із табличними, використовувався метод інтерполювання. Інтерполяцію проводили за допомогою інтерполяційної формули або інтерполяційного многочлена Лагранжа [6].

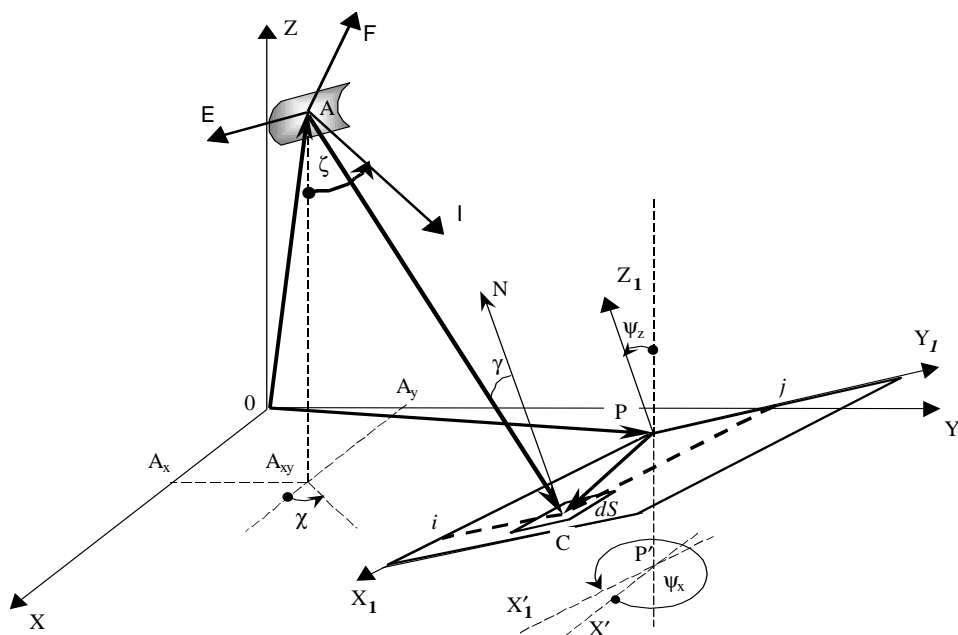


Рис. 5. Геометрична схема опромінювальної світлотехнічної установки з опромінювачем з несиметричним світловим розподілом, заданим фотометричним тілом, знятим на гоніофотометрі (рис.2.):

- OXYZ — система координат опромінювальної установки в цілому;
- AFEI—система координат випромінювача;
- PX₁Y₁Z₁ —система координат приймача;
- AI — оптична вісь ОП;
- χ — кут між віссю OX і проекцією оптичної осі ОП на площину XOY;
- N — одиничний вектор нормалі до ділянки ds ;
- ψ_z — кут між осями PZ₁ і OZ;
- ψ_x — кут між осями OX і PX₁.

Розрахунок $I(\beta, \alpha)$ проводився на ПЕОМ по розробленій програмі згідно алгоритму:

- за заданими координатами точки C визначаються кути β і α ;
- знаходиться ділянка, $[\beta_p, \alpha_q; \beta_{p+1}, \alpha_{q+1}]$ матриці I_{ij} , в яку потрапляє дана точка;
- проводиться лінійна інтерполяція;
- оцінюється похибка лінійного інтерполювання;
- проводиться порівняння абсолютної похибки розрахованої величини з абсолютною похибкою виміряних $I(\beta_p, \alpha_q)$. Якщо похибка розрахованої величини, менша або дорівнює 0,5 одиниці молодшого розряду експериментальних величин, то отримане $I(\beta, \alpha)$ використовується в подальших розрахунках. Якщо ж переважає вказану величину, то відбувається перехід до квадратичної інтерполяції;

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

- якщо похибка квадратичного інтерполювання не перевищує похибки експериментально отриманих величин, то отримане $I(\beta, \alpha)$ береться для подальших розрахунків, якщо ж перевищує — то програма інформує про це оператора.

Для розрахунку опромінення вибраної площини була розроблена ще одна програма, алгоритм якої такий:

- задаються координати ОП в системі OXYZ та кут нахилу ζ його оптичної осі до вертикалі;
- в системі OXYZ задається опромінювальна площина і зв'язується з нею система координат приймача $PX_1Y_1Z_1$;
- на опромінювальній площині вибирається прямокутна ділянка з сторонами $R_{x_1} \times R_{y_1}$, які співпадають з осями PX_1 та PY_1 ;
- задається напрям одиничного вектора нормалі $\vec{N}(N_x, N_y, N_z)$ до вибраної ділянки, який співпадає з віссю PZ_1 ;
- ділянка розбивається на елементарні квадрати з стороною Δ ;
- кожному елементу розбиття присвоюється пара цілих чисел (i, j) , які відповідають його координатам по осях PX_1 і PY_1 , якщо за одиничний відрізок прийняти Δ ;
- за формулою (1) визначається середнє опромінення E_{ij} кожного елемента Δ_{ij} ;
- опромінення всієї ділянки задається матрицею $\{E\}$ розміром $R_{x_1}/\Delta \times R_{y_1}/\Delta$, елементами якої E_{ij} є середні значення опромінення кожного Δ_{ij} .

Висновки

1. На основі експериментальних вимірювань побудовано фотометричні тіла опромінювальних пристроїв з несиметричним світловим розподілом.
2. Запропонована математична модель ОП, в якій система координат джерела випромінювання співпадає з системою координат гоніофотометра, на якому проводилися вимірювання світлового розподілу опромінювача.
3. Розроблено програмне забезпечення та приведено алгоритм розрахунку на комп'ютері опромінення довільно розташованої площини від ОП, світловий розподіл якого заданий фотометричним тілом.

Photometric bodies of the non-symmetric light-distributed irradiation devices were built on the basis of the experimental measurements. Mathematic model of the irradiation device was proposed. Computer calculation programe of irradiation of arbitrary square was developed.

II міжнародна науково-технічна конференція

Література

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 528 с.
2. Справочная книга по проектированию электрического освещения /Под. ред. Г.М.Кноринга. - Л.: Энергия, 1976. - 384 с.
3. Куш О.К. Оптический расчет световых и облучательных приборов на ЭВМ. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 152 с.
4. Живописцев О.А., Косицын О.А. Электротехнология и электрическое освещение. - М.: Агропромиздат. 1990. - 302 с.
5. Никитин В.Д. Расчет освещенности наклонной плоскости// Светотехника. - 1989. - №4. - С.15-16.
6. Самарский А.А., Тулин А.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989. - 429 с.
7. Андрійчук В.А., Герій Я.М. Розрахунок інтегральних характеристик світлового поля некруглосиметричного опромінювача з параболо-циліндричним відбивачем// Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2001. - №4. - С.108-114.