

О. В. Бабенко, к. т. н.; В. В. Захаров; Д. Л. Ферфецький

МЕТОД ПЕРЕХРЕСНОЇ ПЕРЕВІРКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНЮВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

Розроблено метод перехресної перевірки результатів оцінювання освітлювального навантаження під час проведення енергетичного аудиту, який полягає в розкладенні функції сили світла в ряд Фур'є й дозволяє підвищити достовірність отриманих аудитором результатів.

Ключові слова: крива сили світла, ряд Фур'є, просторові ізолюкси, світловий потік, світильник.

Розгляд проблеми і постановка завдання

Актуальність. Системи освітлення є невід'ємною частиною сучасних промислових та цивільних об'єктів. Такі системи повинні задовольняти критерії надійності, економічності та безпеки для здоров'я людини. Для перевірки ефективності використання електроенергії в системах освітлення на підприємствах проводять енергетичні аудити. У процесі проведення енергетичного аудиту після завершення попереднього оцінювання обсягів енергоспоживання для забезпечення повноти й достовірності вихідної інформації енергоаудитори займаються перевіркою даних, яка називається перехресною [1]. Перехресну перевірку здійснюють шляхом отримання значення енергоспоживання іншим достовірним способом і порівняння результату з оціненим. Забезпечення достовірності вхідних даних, зібраних енергоаудитором, є одним з головних критеріїв ефективності аудиторського дослідження.

Постановка задачі дослідження. Велику зацікавленість для енергоаудиторів становлять системи зовнішнього та внутрішнього освітлення великих промислових приміщень, де використовують джерела світла значної потужності (наприклад, лампи ДРЛ), які працюють протягом значного періоду [2, 3].

Перевірка економічності таких систем освітлення передбачає оцінювання фактичного споживання електроенергії. Оскільки основну частину фактично спожитої електроенергії визначають прийнятими світлотехнічними рішеннями, то виникає потреба в їхній автоматизованій перевірці.

Для світлотехнічних розрахунків використовують декілька методів, які зводяться до основних: точкового методу і методу коефіцієнта використання [4]. Метод коефіцієнта використання доцільно застосовувати під час розрахунку загального рівномірного освітлення за відсутності затінь. Точковий метод доцільно застосовувати як за відсутності, так і за наявності затінь, як правило, для світильників прямого світла.

Для розрахунку зовнішнього освітлення або освітлення великих виробничих приміщень, яке іноді є нерівномірним, доцільніше використовувати точковий метод. Застосування ручних розрахунків для реалізації вказаного методу для аудитора не вигідне, оскільки пов'язане із значними витратами часу. Більш ефективним є використання сучасних комп'ютерних програм DIALux, Calculux та інших. З іншого боку, для перехресної перевірки отриманих результатів необхідно використати підходи, які можна було б легко перевірити і зручно отримати необхідну вхідну інформацію [5]. Ураховуючи це, використання комп'ютерних програм іноді призводить до ускладнень у разі відсутності характеристик потрібного світильника в базі даних, особливо якщо здійснюється енергетичний аудит виробничих приміщень із світильниками, які служать тривалий період, тому актуальним є

завдання побудови простих методів аудиторської перехресної перевірки, які для забезпечення швидкодії можна реалізувати з використанням прикладних програм, наприклад, Microsoft Excel. Важливо, щоб ці методи дозволяли використання вхідної інформації про параметри світильників, отриманої аудитором у будь-якій формі (наприклад, із кривих сили світла, отриманих з літератури або інтернет-джерел).

Основним етапом розрахунку освітлення за точковим методом є визначення умовної освітленості e за кривими ізольоксів для точки робочої поверхні, яка характеризується координатами d (відстань від проекції джерела світла до розрахункової точки на робочій поверхні) та розрахункової висоти h (для розрахунку освітлення від круглосиметричних світильників).

У [4, 6] наведено методики побудови просторових ізольоксів. Зокрема, для випадку круглосиметричних світильників такі ізольокси будують із використанням виразу

$$e = \frac{I_{\alpha} \cos^3 \alpha}{h^2}, \quad (1)$$

де I_{α} – значення сили світла для кута α .

Недоліком застосування ізольоксів є громіздкість їхньої побудови. Особливо це відчутно у випадку проведення проектування чи енергетичного аудиту системи освітлення, коли для порівняння пропонують багато типів світильників з різними кривими сили світла.

Звісно, під час проектування часто використовують просторові ізольокси, які вже побудовані для конкретних типів світильників і наведені в довідниках. Однак на ринку світлотехнічної продукції постійно розширюється номенклатура світильників – і необхідних даних для вибраного світильника може не виявитись. У такому разі використовують просторові ізольокси для схожих за характером світлорозподілу світильників. Це призводить до виникнення похибки визначення умовної горизонтальної освітленості e , яка впливає на результат проектування чи аудиту.

Відповідно постає актуальним визначення e аналітично, без використання кривих просторових ізольоксів.

Мета роботи – розробити метод перехресної перевірки отриманої інформації про систему освітлення з круглосиметричними джерелами світла (світильники з лампами ДРЛ і подібні), який характеризується можливістю реалізації з використанням прикладних програм і дозволяє використання вхідної інформації про параметри освітлювальних приладів, отримані аудитором у будь-якій формі.

Обґрунтування результатів

Аналіз виразу (1) показує, що для аналітичного визначення умовної горизонтальної освітленості необхідно знайти функціональну залежність $I_{\alpha}(\alpha)$. У роботі запропоновано отримати залежність $I_{\alpha}(\alpha)$ у результаті розкладу значень сили світла в ряд Фур'є [7].

Функціональна залежність сили світла може бути представлена тригонометричним поліномом

$$I(\alpha) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos n \frac{2\pi}{\alpha_{\max}} \alpha + b_n \sin n \frac{2\pi}{\alpha_{\max}} \alpha \right), \quad (2)$$

де N – кількість членів поліному; α_{\max} – кут, який охоплює криву сили світла (інтервал апроксимації функції сили світла буде $[0 \dots \alpha_{\max}]$); α – кут, за якого необхідно знайти значення сили світла ($0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$); $a_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} I_k \cos n \frac{2\pi k}{m}$, тут $k = 0, 1, 2, \dots, m-1$, де m – кількість значень сили світла, взятих з експериментальної кривої в межах періоду

$$(0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}); b_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} I_k \sin n \frac{2\pi k}{m}.$$

Для прикладу пропонуємо здійснити перехресну перевірку результатів оцінювання економічності освітлювального навантаження виробничого приміщення, у якому використовують 18 світильників РСП-16-400-231, що призначені для загального освітлення запилених і вологих промислових приміщень (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд світильника РСП-16-400-231 і лампи ДРЛ 400, що використовується в ньому

Джерела світла, що використовують у таких світильниках, – лампи типу ДРЛ потужністю 400 Вт. Криву сили світла для цього світильника наведено на рис. 2.

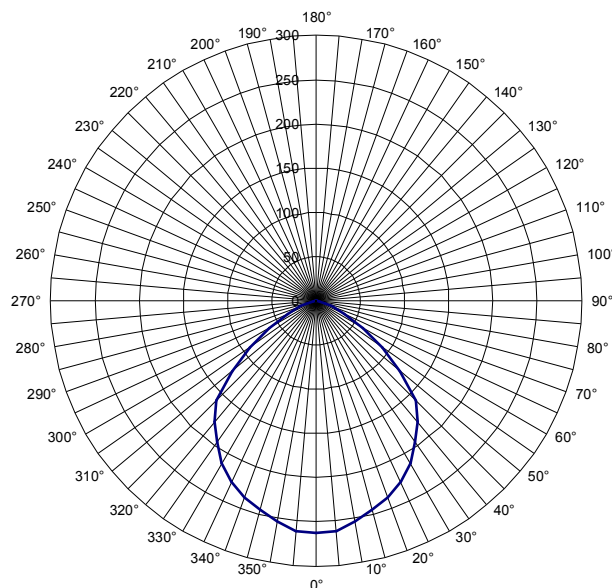


Рис. 2. Крива сили світла для світильника РСП-16-400-231

Параметри виробничого приміщення, у якому здійснюють енергоаудит системи освітлення: ширина – 20 м, довжина – 30 м, розрахункова висота – 5 м. Нормована мінімальна освітленість на робочих місцях – 200 лк.

Значення сили світла світильника, що відповідають кривій (рис. 2), наведено в таблиці 1.

Значення сили світла для світильника РСП-16-400-231

$\alpha, ^\circ$	0	5	10	15	20	25	30	35
$I\alpha, \text{кд}$	123	127	127	132	140	157	191	246
$\alpha, ^\circ$	40	45	50	55	60	65	70	75
$I\alpha, \text{кд}$	268	285	382	429	314	183	34	8

Результати попереднього розрахунку за методом коефіцієнта використання показали доцільність у вказаному приміщенні використати 18 світильників із потужністю ламп 400 Вт і номінальним світловим потоком лампи 24000 лм для забезпечення необхідної мінімальної освітленості в заданих точках робочої поверхні. Однак у результаті вимірювання освітленості в робочій точці за допомогою люксметра встановлено, що реальна освітленість дещо перевищує 200 лк, що свідчить про завищену потужність системи освітлення.

Для перехресної перевірки використано точковий метод розрахунку, для якого для вказаного світильника РСП-16-400-231 на основі значень з реальної кривої сили світла (табл. 1) побудовано просторові ізолюкси (рис. 3).

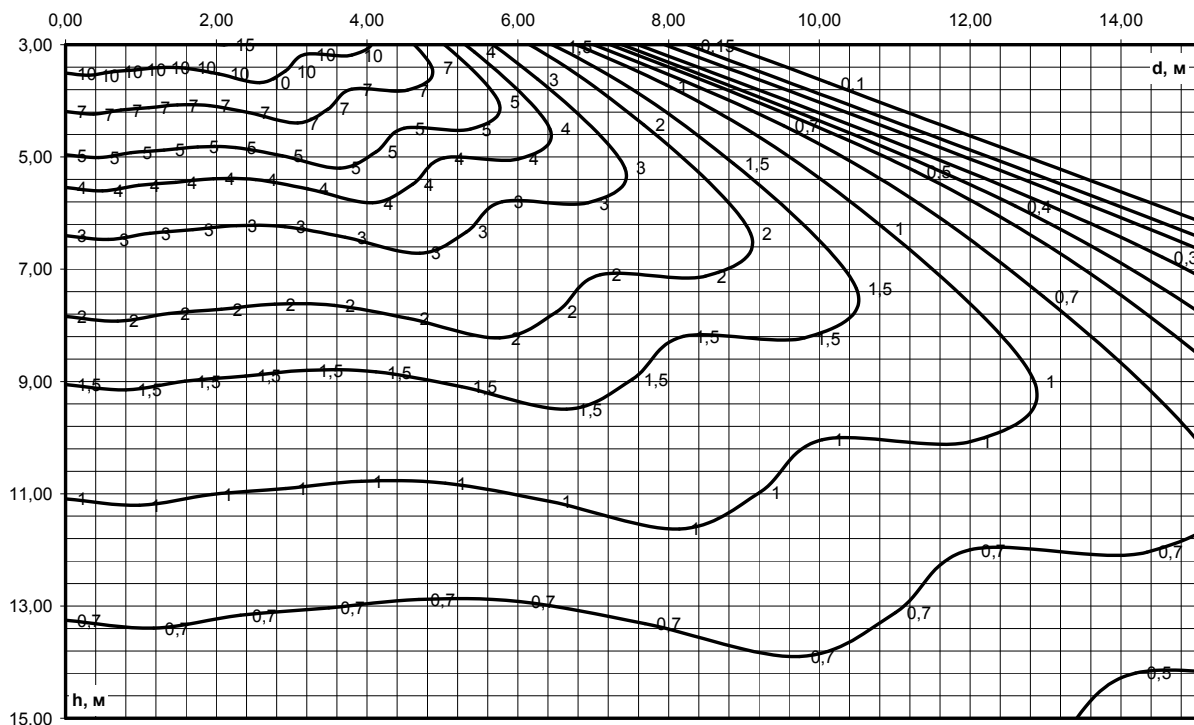


Рис. 3. Просторові ізолюкси умовної горизонтальної освітленості для світильника РСП-16-400-231

У результаті застосування точкового методу розрахунку освітлення і даних, що взяті з рис. 3, отримано результат, який вказує на те, що за умови використання 18 світильників достатньо використати лампи із світловим потоком в межах 18020 лм. Отже, у вказаному приміщенні можна застосувати 18 ламп меншої потужності з меншим світловим потоком, ніж 24000 лм або перерахувати систему освітлення, зменшивши кількість світильників. Тобто є можливість підвищити рівень енергоощадності на підприємстві шляхом зниження споживаної потужності освітлення у досліджуваному приміщенні.

Для перевірки ефективності зменшення кількості світильників необхідно здійснити перерахунок системи освітлення за точковим методом, оскільки зміняться відстані між світильниками. Це вимагає нового використання просторових ізолюксів (рис. 3), що пов'язане з додатковим часом.

Під час проведення енергетичного аудиту необхідно ошадно витратити час, особливо

коли це переддоговірний етап аудиторського дослідження, який може не оплачуватись. Тоді стають актуальними методи досліджень, які дозволяють максимально автоматизувати процес розрахунку і швидко знайти необхідну вхідну інформацію.

Для автоматизованого визначення умовної горизонтальної освітленості e побудовано залежність $I_{\alpha}(\alpha)$ з використанням розкладення в ряд Фур'є:

$$I_{\alpha}(\alpha) = 196,6 - 113,2 \cos\left(\frac{2\pi}{75}\alpha\right) - 63,9 \sin\left(\frac{2\pi}{75}\alpha\right) - 28,6 \cos\left(2\frac{2\pi}{75}\alpha\right) + 69 \sin\left(2\frac{2\pi}{75}\alpha\right) + 30,6 \cos\left(3\frac{2\pi}{75}\alpha\right) + 37,8 \sin\left(3\frac{2\pi}{75}\alpha\right) + 13,9 \cos\left(4\frac{2\pi}{75}\alpha\right) - 7,9 \sin\left(4\frac{2\pi}{75}\alpha\right) \dots \quad (3)$$

У цьому прикладі було використано шість членів поліному.

У результаті комп'ютерного моделювання з використанням виразів (1) і (3) встановлено, що для досягнення мінімальної освітленості 200 лк у найвіддаленішій точці робочого простору приміщення розрахункове значення світлового потоку світильника може бути 19000 лм. Це значно менше за значення 24000, яке використано під час розрахунку методом коефіцієнта використання.

У такому разі, оскільки після застосування залежності (3), процес розрахунку стало легко автоматизувати, було запропоновано зменшити кількість світильників у приміщенні з 18 до 12. Швидко отриманий результат вказав на те, що світловий потік ламп світильників повинен складати 23120 лм. Світловий потік реальної лампи, потужністю 400 Вт, на 3,8% більший за це значення, що відповідає допустимому відхиленню (+20%) [4, 6, 8].

Уважаючи найбільш точним розрахунок системи освітлення з використанням експериментально побудованих просторових ізолюксів можна сказати таке. Похибка визначення світлового потоку лампи, яку необхідно встановити для досягнення необхідної освітленості за використання аналітичної функції кривої сили світла (3), складає 5,6 %.

Використання запропонованого методу перехресної перевірки, в основу якого покладено розкладення функції сили світла в ряд Фур'є, вказує на позитивні економічні наслідки. Так, припускаючи, що освітлення виробничого приміщення використовують 8 годин на добу, 240 днів на рік, а вартість спожитої електроенергії становить 1,2 грн./кВт·год., розрахована економія електроенергії внаслідок зменшення кількості світильників з 18 до 12 складе понад 5500 грн./рік.

Отже, такий метод перехресної перевірки може бути використаний як один з інструментів проведення енергоаудиторських досліджень, особливо у випадках, коли використання сучасних комп'ютерних програм розрахунку освітлення ускладнене через недостатність вхідних даних для останніх. Запропонований метод легко автоматизується за допомогою широко розповсюджених прикладних програм, наприклад, Microsoft Excel.

Висновки

1. Запропоновано метод перехресної перевірки результатів оцінювання освітлювального навантаження виробничих приміщень з круглосиметричними світильниками, який може бути застосований під час проведення енергетичного аудиту й дозволяє отримати уточнене значення освітлюваного навантаження. Вхідними даними для його реалізації є криві сили світла, які існують у різних джерелах як для сучасних світильників, так і тих, що давно використовують.

2. Під час використання розробленого методу відпадає необхідність будувати просторові ізолюкси умовної горизонтальної освітленості, оскільки таку освітленість визначають аналітично з використанням розкладення функції сили світла в ряд Фур'є.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прокопенко В. В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями: Навчальний посібник / Прокопенко В. В., Закладний О. М., Кульбачний П. В. – К. : Освіта України, 2009. – 438 с.
2. Андрійчук В. А. Аналіз систем зовнішнього освітлення та шляхів підвищення їх ефективності / В. А. Андрійчук, С. Ю. Поталіцин // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – Том 68. – № 4. – С. 168 – 175.
3. Мокін Б. І. Вплив несиметрії режиму на роботу освітлювальних установок зовнішнього освітлення та шляхи зменшення втрат активної потужності від протікання струмів несиметрії / Б. І. Мокін, В. А. Барчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 154 – 158.
4. Кнорринг Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Кнорринг Г. М., Фадин И. М., Сидоров В. Н. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.
5. Джеджула В. В. Енергетичний аудит як засіб забезпечення ефективності енергоспоживання промислових підприємств / В. В. Джеджула // Вісник Одеського національного університету. Економіка. – 2013. – Т. 18, Вип. 3/1. – С. 123 – 125.
6. Кнорринг Г. М. Светотехнические расчёты в установках искусственного освещения / Г. М. Кнорринг. – Л. : Энергия, 1973. – 200 с.
7. Овчинников П. П. Вища математика : Підручник у 2-х томах. Ч. 2 / Овчинников П. П., Яремчук Ф. П., Михайленко В. М. – [3-е вид.]. – К. : Техніка, 2008. – 792 с.
8. Справочная книга для проектирования электрического освещения / [Кнорринг Г. М., Оболенцев Ю. Б., Берим Р. И., Крючков В. М.] ; під ред. Г. М. Кнорринга. – Л. : Энергия, 1976. – 384 с.

Бабенко Олексій Вікторович – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Захаров Василь Володимирович – старший викладач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань.

Ферфецький Дмитро Леонідович – студент інституту електроенергетики та електромеханіки.
Вінницький національний технічний університет.