

А. В. Бабенко, к. т. н.; В. В. Захаров; Д. Л. Ферфецкий

МЕТОД ПЕРЕКРЕСТНОЙ ПРОВЕРКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Разработан метод перекрестной проверки результатов оценки осветительных нагрузок при проведении энергетического аудита, заключающийся в разложении функции силы света в ряд Фурье и позволяющий повысить достоверность полученных аудитором результатов.

Ключевые слова: кривая силы света, ряд Фурье, пространственные изолюксы, световой поток, светильник.

Рассмотрение проблемы и постановка задачи

Актуальность. Системы освещения являются неотъемлемой частью современных промышленных и гражданских объектов. Такие системы должны удовлетворять критерии надежности, экономичности и безопасности для здоровья человека. Для проверки эффективности использования электроэнергии в системах освещения на предприятиях проводят энергетические аудиты. В процессе проведения энергетического аудита после завершения предварительной оценки объемов энергопотребления для обеспечения полноты и достоверности исходной информации энергоаудиторы занимаются проверкой данных, которая называется перекрестной [1]. Перекрестную проверку осуществляют путем получения значения энергопотребления другим достоверным способом и сравнения результата с оцененным. Обеспечение достоверности входящих данных, собранных энергоаудитором, является одним из главных критериев эффективности аудиторского исследования.

Постановка задачи исследования. Большой интерес для энергоаудиторов представляют системы внешнего и внутреннего освещения больших промышленных помещений, где используют источники света большой мощности (например, лампы ДРЛ), работающие в течение длительного периода [2, 3].

Проверка экономичности таких систем освещения предусматривает оценивание фактического потребления электроэнергии. Поскольку основную часть фактически потребленной электроэнергии определяют принятыми светотехническими решениями, то возникает потребность в их автоматизированной проверке.

Для светотехнических расчетов используют несколько методов, которые сводятся к основным: точечному методу и методу коэффициента использования [4]. Метод коэффициента использования целесообразно применять при расчете общего равномерного освещения при отсутствии теней. Точечный метод целесообразно применять как при отсутствии, так и при наличии теней, как правило, для светильников прямого света.

Для расчета наружного освещения или освещения больших производственных помещений, которое иногда является неравномерным, целесообразнее использовать точечный метод. Применение ручных расчетов для реализации указанного метода для аудитора не выгодно, поскольку связано со значительными затратами времени. Более эффективным является использование современных компьютерных программ DIALux, Calculux и прочих. С другой стороны, для перекрестной проверки полученных результатов необходимо использовать подходы, которые можно было бы легко проверить и удобно получить необходимую входящую информацию [5]. Учитывая это, использование компьютерных программ иногда приводит к осложнениям в случае отсутствия

характеристик нужного светильника в базе данных, особенно если осуществляется энергетический аудит производственных помещений со светильниками, которые служат длительный период. Поэтому актуальной является задача построения простых методов аудиторской перекрестной проверки, которые для обеспечения быстродействия можно реализовать с использованием прикладных программ, например, Microsoft Excel. Важно, чтобы эти методы позволяли использование входящей информации о параметрах светильников, полученной аудитором в любой форме (например, из кривых силы света, полученных из литературы или интернет-источников).

Основным этапом расчета освещения по точечному методу является определение условной освещенности e по кривым изолуксов для точки рабочей поверхности, характеризующейся координатами d (расстояние от проекции источника света до расчетной точки на рабочей поверхности) и расчетной высоты h (для расчета освещения от круглосимметричных светильников).

В [4, 6] приведены методики построения пространственных изолуксов. В частности, для случая круглосимметричных светильников такие изолуксы строят с использованием выражения

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

где I_{α} – значение силы света для угла α .

Недостатком применения изолуксов является громоздкость их построения. Особенно это ощутимо в случае проведения проектирования или энергетического аудита системы освещения, когда для сравнения предлагают много типов светильников с различными кривыми силы света.

Конечно, при проектировании часто используют пространственные изолуксы, которые уже построены для конкретных типов светильников и приведены в справочниках. Однако на рынке светотехнической продукции постоянно расширяется номенклатура светильников – и необходимых данных для выбранного светильника может не оказаться. В таком случае используют пространственные изолуксы для похожих по характеру светораспределения светильников. Это приводит к возникновению погрешности определения условной горизонтальной освещенности e , которая влияет на результат проектирования или аудита.

Соответственно становится актуальным определение e аналитически, без использования кривых пространственных изолуксов.

Целью работы является разработка метода перекрестной проверки полученной информации о системе освещения с круглосимметричными источниками света (светильники с лампами ДРЛ и подобные), который характеризуется возможностью реализации с использованием прикладных программ и позволяет использование входящей информации о параметрах осветительных приборов, полученной аудитором в любой форме.

Обоснование результатов

Анализ выражения (1) показывает, что для аналитического определения условной горизонтальной освещенности необходимо найти функциональную зависимость $I_{\alpha}(\alpha)$. В работе предложено получить зависимость $I_{\alpha}(\alpha)$ в результате разложения значений силы света в ряд Фурье [7].

Функциональная зависимость силы света может быть представлена тригонометрическим полиномом

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

где N – количество членов полинома; α_{\max} – угол, охватывающий кривую силы света (интервал аппроксимации функции силы света будет $[0 \dots \alpha_{\max}]$); α – угол, при котором необходимо найти значения силы света ($0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$); $a_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} I_k \cos n \frac{2\pi k}{m}$, тут $k = 0, 1, 2 \dots m-1$, де m – количество значений силы света, взятых из экспериментальной кривой в пределах периода ($0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$); $b_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} I_k \sin n \frac{2\pi k}{m}$.

Для примера предлагаем осуществить перекрестную проверку результатов оценки экономичности осветительных нагрузок производственного помещения, в котором используют 18 светильников РСП-16-400-231, предназначенных для общего освещения пыльных и влажных промышленных помещений (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид светильника РСП-16-400-231 и лампы ДРЛ 400, используемой в нем

Источники света, используемые в таких светильниках, – лампы типа ДРЛ мощностью 400 Вт. Кривая силы света для данного светильника приведена на рис. 2.

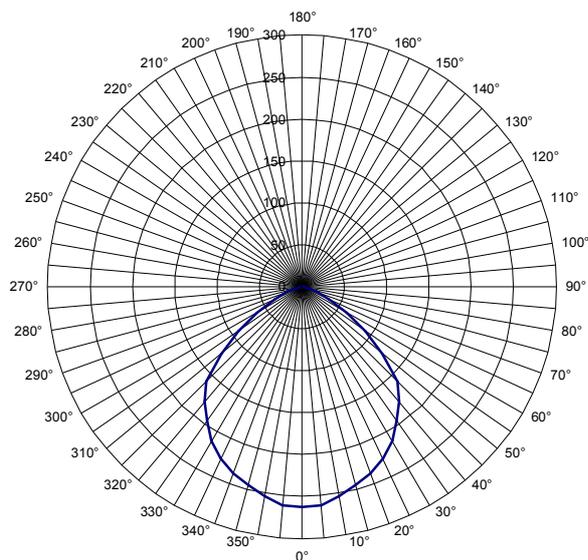


Рис. 2. Кривая силы света для светильника РСП-16-400-231

Параметры производственного помещения, в котором осуществляют энергоаудит системы освещения: ширина – 20 м, длина – 30 м, расчетная высота – 5 м. Нормированная минимальная освещенность на рабочих местах – 200 лк.

Значения силы света светильника, соответствующие кривой (рис. 2), приведены в таблице 1.

Значения силы света для светильника 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

Результаты предварительного расчета по методу коэффициента использования показали целесообразность в указанном помещении использовать 18 светильников с мощностью ламп 400 Вт и номинальным световым потоком лампы 24000 лм для обеспечения необходимой минимальной освещенности в заданных точках рабочей поверхности. Однако в результате измерения освещенности в рабочей точке с помощью люксметра установлено, что реальная освещенность несколько превышает 200 лк, что свидетельствует о завышенной мощности системы освещения.

Для перекрестной проверки использовано точечный метод расчета, для которого для указанного светильника РСП-16-400-231 на основе значений с реальной кривой силы света (табл. 1) построены пространственные изолюксы (рис. 3).

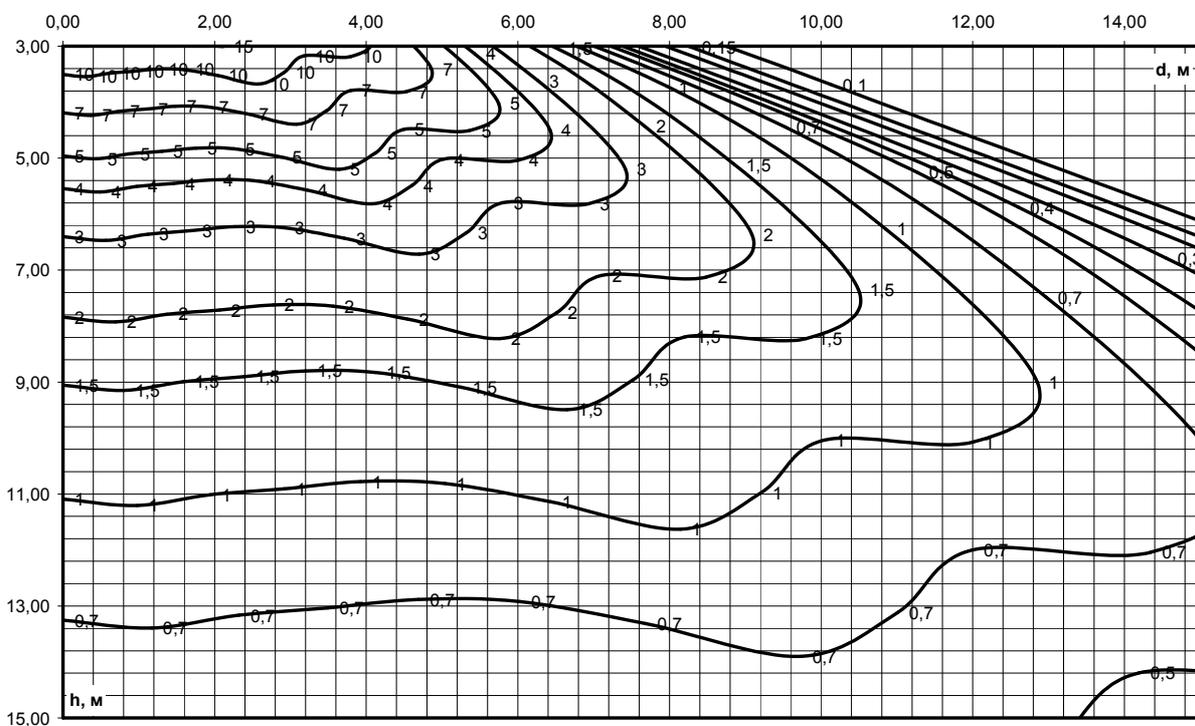


Рис. 3. Пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности для светильника РСП-16-400-231

В результате применения точечного метода расчета освещения и данных, взятых из рис. 3, получен результат, который указывает на то, что при использовании 18 светильников достаточно использовать лампы со световым потоком в пределах 18020 лм. Следовательно, в указанном помещении можно применить 18 ламп меньшей мощности с меньшим световым потоком, чем 24000 лм или пересчитать систему освещения, уменьшив количество светильников. То есть существует возможность повысить уровень энергосбережения на предприятии путем снижения потребляемой мощности освещения в исследуемом помещении.

Для проверки эффективности уменьшения количества светильников необходимо произвести перерасчет системы освещения по точечному методу, поскольку изменятся

расстояния между светильниками. Это требует нового использования пространственных изолюксов (рис. 3), что связано с дополнительным временем.

При проведении энергетического аудита необходимо экономно использовать время, особенно когда это преддоговорной этап аудиторского исследования, который может не оплачиваться. Тогда становятся актуальными методы исследований, позволяющие максимально автоматизировать процесс расчета и быстро найти необходимую входную информацию.

Для автоматизированного определения условной горизонтальной освещенности e построена зависимость $I_{\alpha}(\alpha)$ с использованием разложения в ряд Фурье:

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

В данном примере было использовано шесть членов полинома.

В результате компьютерного моделирования с использованием выражений (1) и (3) установлено, что для достижения минимальной освещенности 200 лк в наиболее удаленной точке рабочего пространства помещения расчетное значение светового потока светильника может быть 19000 лм. Это значительно меньше значения 24000, которое использовано при расчете методом коэффициента использования.

В таком случае, поскольку после применения зависимости (3), процесс расчета стало легко автоматизировать, было предложено уменьшить количество светильников в помещении с 18 до 12. Быстро полученный результат указал на то, что световой поток ламп светильников должен составлять 23120 лм. Световой поток реальной лампы, мощностью 400 Вт, на 3,8% больше этого значения, что соответствует допустимому отклонению (+20%) [4, 6, 8].

Считая наиболее точным расчет системы освещения с использованием экспериментально построенных пространственных изолюксов можно сказать следующее. Погрешность определения светового потока лампы, которую необходимо установить для достижения необходимой освещенности при использовании аналитической функции кривой силы света (3), составляет 5,6 %.

Использование предложенного метода перекрестной проверки, в основу которого положено разложение функции силы света в ряд Фурье, указывает на положительные экономические последствия. Так, предполагая, что освещение производственного помещения используют 8 часов в сутки, 240 дней в году, а стоимость потребленной электроэнергии составляет 1,2 грн. / кВт·час., рассчитанная экономия электроэнергии вследствие уменьшения количества светильников с 18 до 12 составит свыше 5500 грн./год.

Следовательно, такой метод перекрестной проверки может быть использован как один из инструментов проведения энергоаудиторских исследований, особенно в случаях, когда использование современных компьютерных программ расчета освещения является затруднительным из-за недостаточности входящих данных для последних. Предложенный метод легко автоматизируется с помощью широко распространенных программ, например, Microsoft Excel.

Выводы

1. Предложен метод перекрестной проверки результатов оценки осветительных нагрузок производственных помещений с круглосимметричными светильниками, который может быть применен при проведении энергетического аудита и позволяет получить уточненное значение осветительной нагрузки. Входящими данными для его реализации являются

кривые силы света, которые существуют в разных источниках как для современных светильников, так и давно используемых.

2. При использовании разработанного метода отпадает необходимость строить пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности, поскольку такую освещенность определяют аналитически с использованием разложения функции силы света в ряд Фурье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопенко В. В. Энергетичний 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. Энергетичний 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-є 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 Алексей Викторович – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електропотреблення и енергетического менеджмента.

Захаров Василий Владимирович – старший преподаватель кафедри теоретической электротехники и электрических измерений.

Ферфецкий Дмитрий Леонидович – студент інститута електроенергетики и электромеханики. Винницький національний технічний університет.