

Методика выбора энергоэффективного варианта при проектировании системы освещения*

Егоров М. С., аспирант, Кондратьев А. В., канд. техн. наук
НИУ «МЭИ», Москва

Показано, что использование энергоэффективных источников света и светотехнического оборудования при проектировании объектов позволяет снизить эксплуатационные затраты на электропотребление. Однако выбор оптимального оборудования представляет собой трудоемкий процесс определения показателей, подтверждающих целесообразность внедрения современной техники. Приведен метод, упрощающий принятие оптимального решения.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективные источники искусственного освещения, датчики для управления освещением, методика проектирования системы освещения.

В связи с высокой стоимостью светильников новых типов и датчиков для управления освещением при оценке целесообразности их применения следует сравнить капитальные вложения и затраты на электроэнергию в процессе эксплуатации [1]. Для этого необходимо выполнить общий расчет, состоящий из четырех этапов:

1. Светотехнический расчет с целью определения числа и мощности светильников различных типов [2 – 4].

2. Расчет числа датчиков для управления освещением [5].

3. Вычисление общего предполагаемого потребления.

4. Выбор экономически эффективного варианта по диаграммам затрат.

1. Светотехнический расчет, выполняемый по методу коэффициента использования светового потока [2, 3], применим для помещений прямоугольной формы. Что касается помещения сложной формы, сначала его условно делят на отдельные прямоугольники, а затем каждый участок рассчитывают указанным методом.

При выборе осветительных установок для каждого помещения учитывают требования к качеству освещения (уровню освещенности на рабочих местах).

2. Для расчета числа датчиков присутствия (ДП) или датчиков движения (ДД), достаточного для всего помещения, последнее разделяют на квадраты, каждая сторона которых ($a = R\sqrt{2}$) пропорциональна радиусу зоны четкой чувствительности датчика R . Далее определяют число датчиков:

$$N_p = \frac{F}{S_{\text{кв}}} = \frac{F}{a^2} = \frac{F}{2R^2}, \quad (1)$$

где F — площадь прямоугольного помещения; $S_{\text{кв}}$ — площадь квадрата, вписанного в зону четкой идентификации датчика.

Полученное расчетное значение N_p округляют в ближайшую сторону.

Количество датчиков освещенности (ДО) находят исходя из числа рядов светильников относительно окон, поскольку световой поток естественного освещения снижается пропорционально квадрату расстояния от окна до ряда светильников. Следует также учитывать, что к ДО возможно подключение не более 15 электронных пускорегулирующих аппаратов типа ЭПРА [6].

3. При технико-экономическом расчете наиболее приемлемого числа приборов освещения для каждого типа помещения [2] необходимо знать значение электропотребления. С целью его определения используют приближенный метод, согласно которому

$$W_{\text{год}} = kP_{\Sigma}T_{\text{год}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{год}}$ — потребление электроэнергии за год, кВт·ч/год; P_{Σ} — суммарная мощность, включающая в себя мощность, потребляемую осветительными установками, датчиками, а также потери мощности; $T_{\text{год}} = 8760$ ч — число часов в году; k — коэффициент, учитывающий неравномерность потребления электроэнергии, связанную со сменой дня и ночи в течение суток, с рабочим графиком обслуживающего персонала, с сезонными изменениями светового дня, с регулированием светового потока (при расчете электропотребления системой освещения необходимо иметь значение этого коэффициента для помещений разных типов).

Для случая, когда световой поток не регулируется, выражение (2) приобретает следующий вид:

$$W_{\text{год}} = \left[\frac{(k_6^3 + k_6^{\text{л}})}{2} \alpha_6 + \frac{(k_в^3 + k_в^{\text{л}})}{2} \alpha_в \right] P_{\Sigma} T_{\text{год}}, \quad (3)$$

где α_6 — доля будних дней в году ($\alpha_6 = 0,68$ для 247 дней); $\alpha_в$ — доля выходных дней в году ($\alpha_в = 0,32$ для 118 дней); k_6^3 и $k_6^{\text{л}}$, $k_в^3$ и

* Работа поддержана Советом по грантам Президента РФ (договор № 14.256.14.3984-МК).

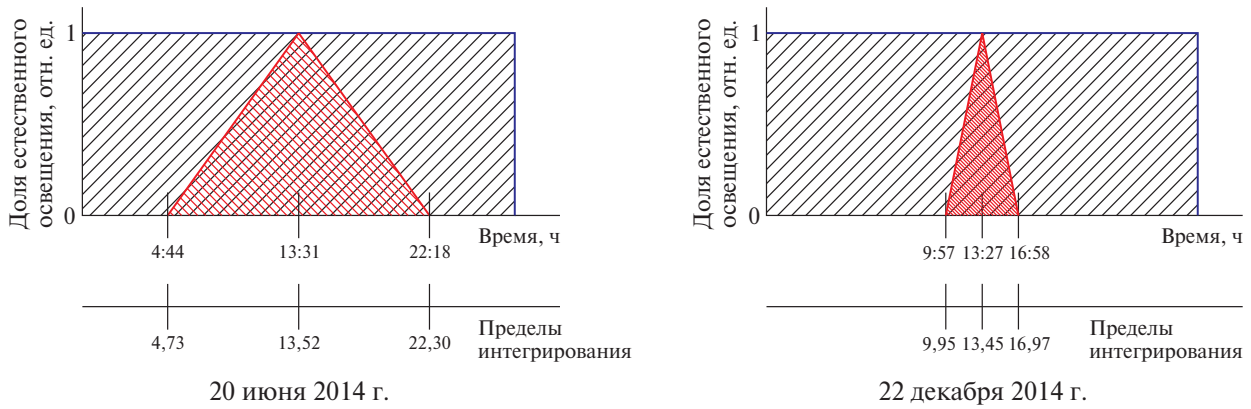


Рис. 1

$k_B^Л$ — коэффициенты, учитывающие неравномерность потребления электроэнергии в зимнее и летнее время в будни и в выходные дни, а также неравномерность потребления из-за специфики использования помещения и графика работы людей.

Для упрощения условимся, что

$$\frac{(k_6^3 + k_6^Л)}{2} \alpha_6 + \frac{(k_B^3 + k_B^Л)}{2} \alpha_B = k_1.$$

Тогда формула (3) примет вид:

$$W_{\text{год}} = k_1 P_{\Sigma} T_{\text{год}} \quad (4)$$

При регулировании светового потока с помощью ДО формула (2) преобразуется к виду:

$$W_{\text{год}} = \left[\frac{(k_6^3 k_e^3 + k_6^Л k_e^Л)}{2} \alpha_6 + \frac{(k_B^3 k_e^3 + k_B^Л k_e^Л)}{2} \alpha_B \right] P_{\text{св}} T_{\text{год}} + N_d P_d T_{\text{год}}, \quad (5)$$

где N_d — число датчиков; $P_{\text{св}}$ — мощность светового потока; P_d — потребление датчиков (считаем, что оно не изменяется в течение года); k_e^3 и $k_e^Л$ — коэффициенты, учитывающие снижение потребления электроэнергии за счет регулирования светового потока в зимнее и летнее время.

Помимо указанного, будем считать, что при восходе солнца световой поток растет линейно и при своем максимуме создает освещенность, достаточную для помещения без применения искусственных источников света. Так, на примере светового дня в Москве в 2014 г. (рис. 1) видно, что она возростала от 0 до 1 с 4:44 до 13:31 ч летом и с 9:57 до 13:27 ч зимой, а во время захода солнца, наоборот, падала от 1 до 0 с 13:31 до 22:18 ч летом и с 13:27 до 16:58 ч зимой. Заштрихо-

ванная область S на графике соответствует потреблению электроэнергии без регулирования светового потока, а закрашенная — доле сэкономленной электроэнергии $S_{\text{ЭК}}$.

Коэффициенты k_e^3 и $k_e^Л$ вычисляются по формуле

$$k_e^{3,Л} = 1 - \frac{S_{\text{ЭК}}^{3,Л}}{S}. \quad (6)$$

Площадь $S_{\text{ЭК}}$ образуется путем пересечения двух линейных функций и оси времени. Найти эту площадь можно путем суммирования двух интегралов:

$$S_{\text{ЭК}}^{3,Л} = S_1^{3,Л} + S_2^{3,Л}, \quad (7)$$

где

$$S_1^{3,Л} = \int_{x_{Н1}^{3,Л}}^{x_B^{3,Л}} (k_1^{3,Л} x^{3,Л} + b_1^{3,Л}) dx = k_1^{3,Л} \frac{(x_B^{3,Л})^2 - (x_{Н1}^{3,Л})^2}{2} + b_1^{3,Л} (x_B^{3,Л} - x_{Н1}^{3,Л}); \quad (8)$$

$$S_2^{3,Л} = \int_{x_B^{3,Л}}^{x_{Н2}^{3,Л}} (k_2^{3,Л} x^{3,Л} + b_2^{3,Л}) dx = k_2^{3,Л} \frac{(x_{Н2}^{3,Л})^2 - (x_B^{3,Л})^2}{2} + b_2^{3,Л} (x_{Н2}^{3,Л} - x_B^{3,Л});$$

$$\left. \begin{aligned} k_1^{3,Л} &= \frac{1}{x_B^{3,Л} - x_{Н1}^{3,Л}}; \\ k_2^{3,Л} &= \frac{1}{x_B^{3,Л} - x_{Н2}^{3,Л}}; \\ b_1^{3,Л} &= -k_1^{3,Л} x_{Н1}^{3,Л} = 1 - k_1^{3,Л} x_B^{3,Л}; \\ b_2^{3,Л} &= -k_2^{3,Л} x_{Н2}^{3,Л} = 1 - k_2^{3,Л} x_B^{3,Л}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В приведенных формулах $x_{Н1}^{3,Л}$ — время начала восхода солнца; $x_B^{3,Л}$ — время нахож-

Время года	k_1	b_1	k_2	b_2	S_1	S_2	$S_{эк}$	k_e
Зима	0,287	-2,86	-0,286	4,85	1,75	1,75	3,50	0,85
Лето	0,114	-0,54	-0,114	2,54	4,40	4,40	8,80	0,63

дения солнца в зените; $x_{н2}^{3.л}$ — время конца захода солнца; $x_1^{3.л}$ и $x_2^{3.л}$ — координаты по оси времени на восходящем и нисходящем участках графика; $k_1^{3.л}$, $b_1^{3.л}$ и $k_2^{3.л}$, $b_2^{3.л}$ — коэффициенты линейных восходящей и нисходящей функций.

Найденные по формуле (6) для рассматриваемого примера значения коэффициентов $k_e^{3.л}$, учитывающих снижение потребления электроэнергии в зимнее и летнее время за счет регулирования светового потока, приведены в таблице.

В конечном итоге формула (5) примет вид:

$$W_{год} = k_2 P_{св} T_{год} + N_d P_d T_{год},$$

где

$$k_2 = \frac{(k_6^3 k_e^3 + k_6^л k_e^л)}{2} \alpha_6 + \frac{(k_в^3 k_e^3 + k_в^л k_e^л)}{2} \alpha_в. \quad (10)$$

При регулировании светового потока ДД формулу (2) запишем следующим образом:

$$W_{год} = k_c k_1 P_{св} T_{год} + N_d P_d T_{год} - 180 P_{св}, \quad (11)$$

где k_c — коэффициент снижения потребления электроэнергии при установке ДД.

Для офисов, демонстрационных залов, подсобных и технических помещений $k_c = 1$, так как искусственное освещение в них используется только при наличии там людей. В коридорах и санузлах освещение зачастую включено и при их отсутствии, поэтому $k_c < 1$.

С целью учета снижения электропотребления в офисах, демонстрационных залах, подсобных и технических помещениях в формулу (11) введен член $-180 P_{св}$, учитывающий вероятность того, что искусственное освещение может быть включено даже в случаях отсутствия в помещении людей. Допустим, что подобное может случиться 1 раз в месяц, т. е. составить $(24 - 9) \cdot 12 = 180$ ч в год (здесь 9 — продолжительность рабочего дня, ч).

При установке ДП формула (2) примет вид:

$$W_{год} = k_{дим} k_c k_2 P_{св} T_{год} + N_d P_d T_{год} - 180 P_{св}. \quad (12)$$

Коэффициент димирования $k_{дим}$ учитывает, что при плавном регулировании более эффективно используется естественное освещение, а значит, снижается электропотребление.

4. Для оценки и выбора приемлемого и энергоэкономичного варианта построим диаграмму затрат (рис. 2), по оси X которой отложим затраты на электроэнергию \mathcal{E} , тыс. руб./год, а по оси Y — капитальные вложения в оборудование K , тыс. руб. (см. рис. 2, где приняты следующие обозначения: ЭмПРА — электромагнитные пускорегулирующие аппараты; Т8 и Т5 — тип люминесцентных ламп диаметром 25 и 16 мм; СД — светодиодный источник освещения). Самый экономически выгодный вариант находится ближе всего (на минимальном расстоянии) от центра координат. Расстояние от центра координат r_i до требуемой точки I можно найти по формуле

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} = \sqrt{\mathcal{E}_i^2 + K_i^2}. \quad (13)$$

Поскольку размерности и порядки чисел \mathcal{E} и K различные, для определения r_i переведем их в относительные единицы. В таком случае формула (13) примет вид:

$$r_i^* = \sqrt{x_i^{*2} + y_i^{*2}} = \sqrt{\mathcal{E}_i^{*2} + K_i^{*2}}, \quad (14)$$

где

$$\mathcal{E}_i^* = \frac{\mathcal{E}_i}{\max\{\mathcal{E}_i\}};$$

$$K_i^* = \frac{K_i}{\max\{K_i\}}.$$

Варианты с минимальным r являются наиболее выгодными.

Рассмотренный метод определения оптимального оборудования был применен на этапе проектирования офисного здания. Сопоставление для одного из его этажей варианта 1 с ЭмПРА и люминесцентными лампами Т8 и варианта 2 с использованием энергоэффективных источников света и оборудования для управления ими (рис. 3) показало следующее:

за 5 лет работы эксплуатационные затраты (без учета трудозатрат на замену ламп) в первом варианте в 3,5 раза оказываются выше, чем во втором (см. рис. 3, а), что обусловлено более высоким электропотреблением и меньшим сроком службы ламп;

разница в капитальных вложениях составляет менее 10 % (см. рис. 3, б). Это объясняется установкой меньшего числа современ-

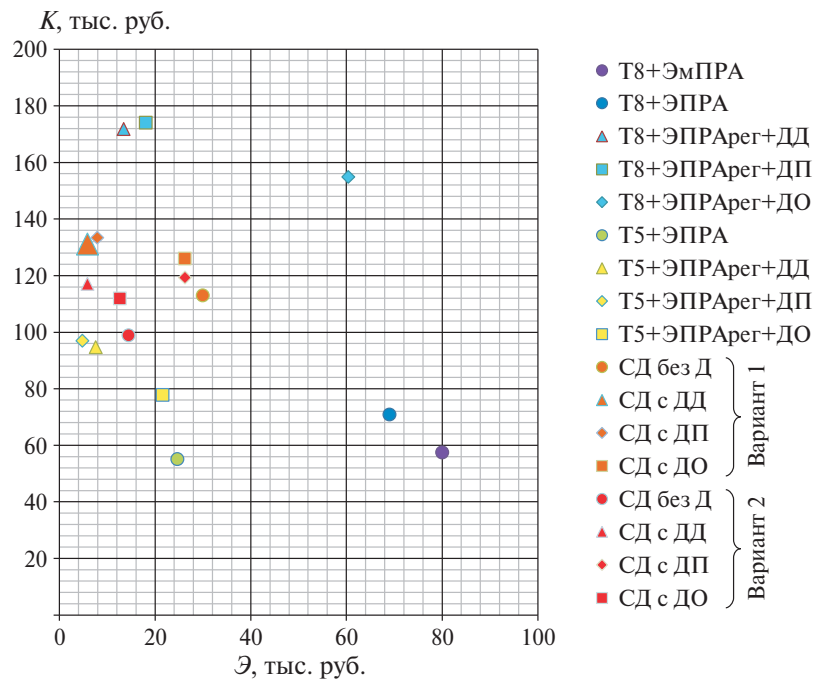


Рис. 2

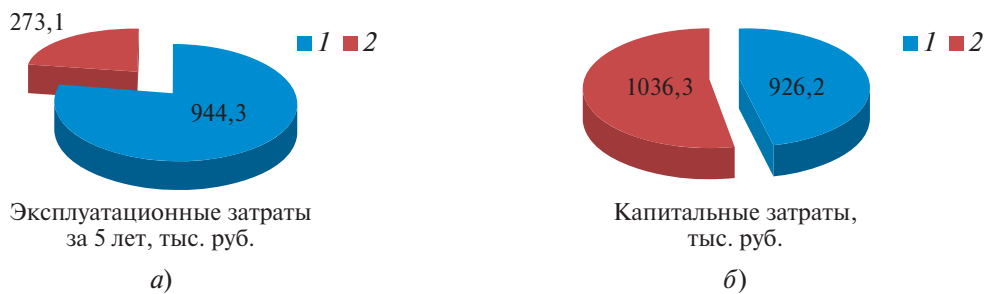


Рис. 3

ных светильников с более высоким световым потоком.

Применение приведенного метода расчета показывает, что выбор источника освещения и датчика зависит от типа помещения:

использование люминесцентных светильников целесообразно только при потребности в большем числе светодиодных источников света для достижения такого же уровня освещенности и показателей качества освещения (что характерно для офисных помещений);

в местах общего пользования (в коридорах и на лестницах) следует применять светодиодные приборы освещения либо люминесцентные с ЭПРА вместе с датчиками освещенности.

На стадии проектирования рассмотренный метод упрощает поиск оптимального решения при выборе светотехнического оборудования по несложному алгоритму, который может быть реализован с помощью программно-вычислительных средств. При этом

коэффициенты, используемые в расчетах, достаточно просто пересчитываются для любого региона и базового года.

Список литературы

1. **Энергосбережение** в освещении / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. — М.: Знак, 1999.
2. **Козловская В. Б., Радкевич В. Н., Сацкевич В. Н.** Электрическое освещение: Справочник. — Минск: Техноперспектива, 2007.
3. **Конюхова Е. А.** Электроснабжение объектов: Учеб. пособие для студентов. 5-е изд. — М.: Издательский центр “Академия”, 2008.
4. **Коган Л. М.** Новые светодиоды и устройства на их основе. — Светотехника, 1997, № 3.
5. **Вернер В.** Интеллектуальные системы управления внутренним освещением. — Светотехника, 1993, № 4.
6. **Рекомендации** по проектированию автоматического управления освещением в зданиях с помощью датчиков присутствия, датчиков движения, датчиков освещения в проектах систем освещения для экономии электроэнергии. — М.: ООО “ИЗОЛЮКС РУС”, 2012.