

УДК 621.321

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЕТИЛЬНИКОВ**

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, Д. С. КОЧЕМАЗОВ, Г. А. РУДЧЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** электрический светильник, коммутация, время включения, эксплуатационные затраты, эффективность.

### **Введение**

Как в бытовых условиях, так и на производстве возможны многочисленные коммутации в системах электрического освещения. Между тем, каждая коммутация снижает ресурс осветительных элементов из-за влияния переходных процессов. Особенно это актуально для газонаполненных ламп. Так, в установившемся режиме эмиссионное покрытие электродов люминесцентной лампы разрушается довольно медленно. Гораздо более интенсивное распыление эмиссионного вещества происходит при ее включении. Светодиоды намного менее критичны к коммутациям, чем газонаполненные лампы. Однако все светодиодные светильники, питающиеся от стандартного переменного напряжения 220 В, содержат блоки питания, которые имеют ограниченное количество циклов включения-отключения.

В случае большого количества переключений возможен вариант, когда лампа или светильник преждевременно выйдут из строя, что приведет к дополнительным финансовым затратам на их замену и утилизацию. Если за некоторый интервал времени эти затраты превысят стоимость потребленной светильником электроэнергии, то можно говорить о его неэффективной эксплуатации.

Цель представленных исследований: снизить эксплуатационные расходы на систему электрического освещения путем оптимизации интервалов включения-отключения светильников.

### **Состояние проблемы**

В научной литературе рассматриваемая проблема представлена очень слабо. Так, в [1] предлагается определять ресурс источника света по деградации его светового потока. При этом причины, приводящие к такой деградации, не выявляются.

В [2] анализируют различные источники света, в том числе с учетом их коммутационной способности, однако никаких числовых параметров не приводится.

В [3] предлагается система автоматического управления освещением на основе технологии «Интернет вещей». Последствия от многочисленных коммутаций не рассматриваются.

В [4] дана информация о содержании в различных источниках света вредных веществ и об их влиянии на окружающую среду.

В [5] приведены значения сроков службы различных светодиодных светильников. Вопросы их коммутационной способности не рассматриваются.

В [6] изучается зависимость светового потока осветительных ламп от значений питающего напряжения.

Таким образом, в литературе фактически отсутствуют сведения о влиянии количества коммутаций на сроки службы источников света и на финансовые затраты, связанные с заменой и утилизацией этих источников. Тем не менее, по мнению авторов, такое влияние очевидно и должно быть исследовано.

**Определение максимально допустимого количества коммутаций осветительной установки**

Будем полагать, что каждое включение осветительной установки эквивалентно финансовым затратам, обусловленным физическим износом этой установки из-за коммутационных переходных процессов. После некоторого количества циклов включения-отключения какой-либо из ее элементов выйдет из строя. В результате потребуется закупить отказавшие элементы и выполнить их монтаж.

Исходя из эвристических соображений (после логических рассуждений), а также с учетом рекомендаций [7] выражение для определения эквивалентных материальных затрат на одно включение группы светильников  $Z_{вкл}$  запишем следующим образом:

$$Z_{вкл} = \frac{(C_{л} + Z_{м.л} + Z_{ут.л})n_{л}}{m_{л}} + \frac{(C_{ПРА} + Z_{мПРА} + Z_{утПРА})n_{ПРА}}{m_{ПРА}}, \text{ USD}, \quad (1)$$

где  $C_{л}$ ,  $C_{ПРА}$  – соответственно, цена одной лампы и одного ПРА, USD;  $Z_{м.л}$ ,  $Z_{ут.л}$ ,  $Z_{мПРА}$ ,  $Z_{утПРА}$  – соответственно, затраты на монтаж и утилизацию одной лампы и одного ПРА, USD;  $n_{л}$ ,  $n_{ПРА}$  – соответственно, количество ламп и ПРА в осветительной установке;  $m_{л}$ ,  $m_{ПРА}$  – соответственно, допустимое количество циклов включения-отключения ламп и ПРА.

Таким образом, для расчета эквивалентных материальных затрат на одно включение необходимы статистические показатели  $m_{л}$  и  $m_{ПРА}$ . Они могут быть получены экспериментальным путем при испытаниях светильников на отказ. Подобные испытания, как правило, проводят на предприятиях-изготовителях.

Предположим, что за некоторое время эксплуатации  $T_э$  осветительная установка была подвергнута  $N$  циклам включения-отключения. Тогда суммарное время пребывания установки во включенном состоянии составит:

$$T_{вкл} = \sum_{i=1}^N T_{вкл i}, \quad (2)$$

где  $T_{вкл i}$  – время пребывания установки во включенном состоянии в течение  $i$ -го цикла включения-отключения;  $N$  – количество циклов включения-отключения.

Затраты на потребленную установкой в установившемся режиме электроэнергию  $Z_{э.э}$  за время эксплуатации  $T_э$  составят:

$$Z_{э.э} = C_э P T_{вкл}, \text{ USD}, \quad (3)$$

где  $C_э$  – удельная стоимость электроэнергии, USD/кВт · ч;  $P$  – суммарная активная мощность, потребляемая осветительной установкой, кВт.

Если по истечении времени  $T_э$  будет выполняться неравенство

$$N Z_{вкл} > Z_{э.э}, \quad (4)$$

то эксплуатацию осветительной установки можно признать неэффективной. Это значит, что за время  $T_3$  произошло настолько много коммутаций, что эквивалентные затраты на них превышают затраты на потребленную электроэнергию. Явный финансовый ущерб будет наблюдаться, когда за интервал  $T_3$  выполняются условия  $N > m_d$  или  $N > m_{\text{ПРА}}$ , т. е. когда элементы установки начнут выходить из строя по причине чрезмерных коммутаций.

Из неравенства (4) следует, что возможны условия, когда увеличение длительности пребывания осветительной установки во включенном состоянии окажется финансово более выгодным, несмотря на рост электропотребления.

Из приведенных аргументов следует, что для повышения эффективности эксплуатации осветительной установки должно выполняться неравенство

$$N < \frac{3_{\text{э.э.}}}{3_{\text{вкл}}} \quad (5)$$

Учитывая (5) и (3), можно записать условие максимально допустимого количества коммутаций  $N_{\text{max}}$  осветительной установки за любой интервал времени  $T_3$ :

$$N_{\text{max}} = \frac{C_3 P T_{\text{вкл}}}{3_{\text{вкл}}} = C_3 k T_{\text{вкл}}, \quad (6)$$

где  $k = \frac{P}{3_{\text{вкл}}}$  – коэффициент, характеризующий конкретную осветительную установку.

Наиболее удобно принять  $T_3 = 24$  ч.

В выражении (6) переменными параметрами являются только удельная стоимость электроэнергии  $C_3$  и суммарное время пребывания установки во включенном состоянии  $T_{\text{вкл}}$ . При этом параметр  $T_{\text{вкл}}$ , как правило, – величина случайная, зависящая от времени года, функций освещаемого помещения, поведения людей и т. д.

Рассмотрим пример расчета.

Пусть в помещении промышленного предприятия установлены 9 электросветильников с лампами Т8/840-36W-КС (цена с НДС 1,54 USD) по две штуки в каждом. Стоимость утилизации одной лампы примем равной 0,32 USD [8]. В качестве ПРА используются ЭМПРА стоимостью 1,6 USD.

Среднее допустимое количество циклов включений-отключений для бюджетных люминесцентных ламп рассматриваемого типа примем равным 1500, а для ПРА, соответственно, 1800. Затраты на монтаж можно принять равными 30 % от стоимости оборудования [7, с. 35]. Тогда при одновременном включении всех электросветильников эквивалентные затраты на одно включение в соответствии с формулой (1) составят:

$$3_{\text{вкл}} = \frac{(1,54 + 0,3 \cdot 1,54 + 0,32)18}{1500} + \frac{(1,6 + 0,3 \cdot 1,6)9}{1800} = 0,038 \text{ USD}.$$

Следовательно, при одновременном включении всех электросветильников и стоимости электроэнергии 0,1 USD за 1 кВт · ч максимально допустимое количество коммутаций по формуле (6) будет равно

$$N_{\text{max}} = \frac{0,1 \cdot 36 \cdot 18 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{вкл}}}{0,038} = 1,705 T_{\text{вкл}}.$$

В таблице приведены значения  $N_{\max}$  для различных значений  $T_{\text{вкл}}$  в течение суток.

**Зависимость  $N_{\max}$  от  $T_{\text{вкл}}$  за 24 ч эксплуатации**

$T_{\text{вкл}}, \text{ч}$	0,59	1,17	2,35	4,7	7,04	9,38	14,1	18,8	23,5
$N_{\max}$	1	2	4	8	12	16	24	32	40

Из таблицы следует, что если рассматриваемая осветительная установка включается только на 0,6 ч в сутки, то коммутировать ее более чем один раз за эти сутки будет финансово невыгодно. Если же установка суммарно включена в течение суток 14 ч, то включать-отключать ее можно не более 24 раз.

Очевидно, что выражение (6) не может быть использовано как окончательное для расчета оптимального времени эксплуатации осветительной установки, поскольку при неоправданно высоких значениях  $T_{\text{вкл}}$  будут наблюдаться перерасход электроэнергии и естественное снижение ресурса установки. Следовательно, необходимо стремиться к оптимуму между снижением материальных затрат на эксплуатацию систем освещения и вопросами энергосбережения.

**Мероприятия, повышающие эффективность эксплуатации осветительной установки**

Будем выделять два основных направления по мероприятиям, обеспечивающим повышение эффективности эксплуатации осветительных установок: организационные мероприятия и технические мероприятия (рис. 1).

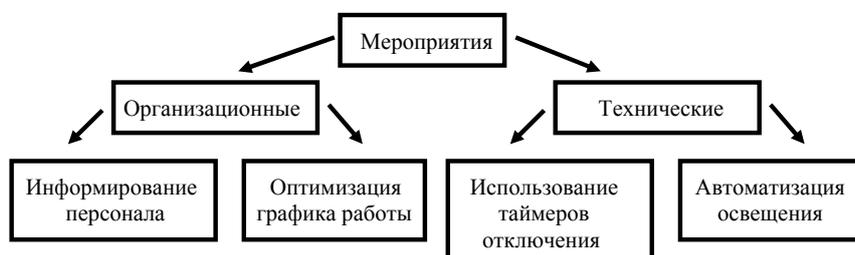


Рис. 1. Мероприятия, повышающие эффективность эксплуатации осветительных установок

Организационные мероприятия по информированию персонала должны заключаться в предоставлении работникам предприятия информации о максимальном количестве коммутаций светильников в зависимости от времени года и особенностей технологического процесса. Также возможно размещение соответствующих надписей рядом с выключателями осветительной установки.

Оптимизация графика работы может быть осуществлена таким образом, чтобы минимизировать вероятность как многократных включений-отключений светильников, так и их слишком длительного нахождения во включенном состоянии.

В качестве таймеров отключения можно использовать электронные устройства, представляющие собой малогабаритные реле времени, встраиваемые в выключатель и задерживающие на требуемый интервал времени отключение светильников. Для удобства эксплуатации у таких реле должна быть функция дистанционного программирования установки, например, по радиоканалу с помощью смартфона.

Из всех видов возможных мероприятий наиболее эффективным необходимо признать установку автоматической системы управления освещением. Благодаря возможностям современных электронных средств такая система может быть оснащена интеллектуальными функциями в соответствии с интенсивно развивающейся в последние годы концепцией *Smart Grid* (разумные сети). Рассмотрим возможный вариант организации подобной системы.

Пусть имеется некоторое производственное помещение, в котором установлены три ряда светильников по пять в каждом ряду (рис. 2).

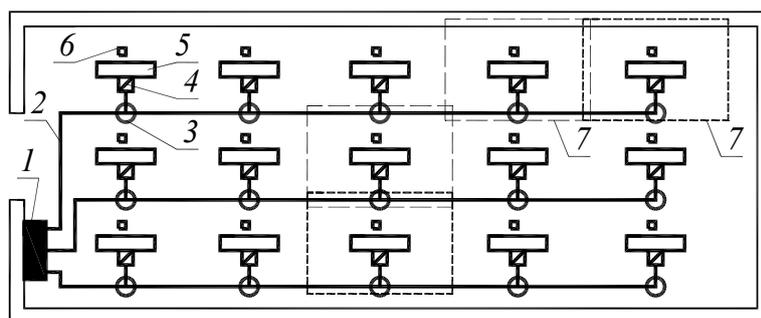


Рис. 2. План помещения со светильниками

От распределительного щитка 1, в котором можно поместить основной модуль системы управления, прокладываются кабели 2 по стенам и потолку. Далее от ответвительных коробок 3 кабели присоединяются к электронным реле 4, управляющим включением-отключением светильников 5. По всему помещению располагаются датчики присутствия людей 6. Зоны действия светильников 7 на границах могут несколько перекрываться.

Модуль управления необходимо оснастить интерфейсом связи с электронными реле и датчиками присутствия либо по радиоканалу, либо по технологии *PLC*, т. е. с использованием высокочастотного сигнала в линиях электропередачи (кабелях).

Программное обеспечение системы управления должно распознавать текущую ситуацию и оптимально включать-отключать светильники в соответствии со следующими приоритетами в порядке понижения их значимости:

- 1) обеспечение необходимого уровня освещенности рабочего места во время присутствия работника;
- 2) повышение ресурса эксплуатации светильников путем регулирования их длительности нахождения во включенном состоянии;
- 3) решение задач энергосбережения.

Приоритет ресурсосбережения перед энергосбережением обусловлен планируемым вводом в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции и ожидаемым избытком электроэнергии в стране.

На основе результатов расчета по предложенной методике в части цеха производства пластмассовых изделий № 1 ЗАО «Легпромразвитие» г. Бобруйска было внедрено рационализаторское предложение по оптимизации эксплуатации электрических светильников, что позволило существенно увеличить срок службы источников света. Затраты на ремонтно-эксплуатационное обслуживание ламп уменьшились в 3 раза, соответственно, снизились расходы на их утилизацию, снизилось время простоя, вызванное временным отсутствием освещения в рабочей зоне и уменьшилось количество человеко-часов на обслуживание систем освещения. На данный момент планируется внедрение этой методики на территории нескольких цехов ЗАО «Легпромразвитие», ОАО «Белшина», ОАО «Бобруйскагропромаш» и РУП «БЗТДиА».

**Корректировка эксплуатационных расходов при проектировании систем электрического освещения**

Предположим, что внедрение предлагаемой методики позволит получить значение реального срока службы осветительной установки  $T_{кор}$  в  $\alpha$  раз выше по сравнению с ее сроком службы  $T_{исх}$  без применения этой методики:

$$T_{кор} = \alpha T_{исх} \tag{7}$$

Очевидно, что если  $\alpha > 1$ , то это позволит уменьшить эксплуатационные расходы организации путем снижения сумм амортизационных отчислений  $Z_{аморт}$  (для светильников  $\alpha = \alpha_{св}$ ) и сумм на ремонтно-эксплуатационное обслуживание  $Z_{обсл}$  (для источников света  $\alpha = \alpha_{ис}$ ). Следовательно, таким образом можно снизить сумму эксплуатационных затрат уже на этапе проектирования систем электрического освещения.

Пусть в некотором проекте эксплуатационные затраты равны:

$$Z_{исх} = Z_{аморт} + Z_{обсл} + Z_{ост} \tag{8}$$

где  $Z_{аморт}$  – затраты на амортизационные отчисления;  $Z_{обсл}$  – затраты на ремонтно-эксплуатационное обслуживание;  $Z_{ост}$  – все остальные затраты.

После применения предлагаемой методики эксплуатационные затраты составят:

$$Z_{кор} = Z_{аморт.кор} + Z_{обсл.кор} + Z_{доп} + Z_{ост} \tag{9}$$

где  $Z_{аморт.кор}$  – откорректированные затраты на амортизационные отчисления;  $Z_{обсл.кор}$  – откорректированные затраты на ремонтно-эксплуатационное обслуживание;  $Z_{доп}$  – дополнительные затраты на организационно-технические мероприятия по описанной выше методике.

Снижение эксплуатационных затрат будет наблюдаться, если выполнится условие:

$$Z_{исх} - Z_{кор} > 0. \tag{10}$$

Подставив (8) и (9) в (10), получим:

$$Z_{аморт} + Z_{обсл} - Z_{аморт.кор} - Z_{обсл.кор} - Z_{доп} > 0. \tag{11}$$

В настоящее время в соответствии с [9] и [10] для всех объектов основных средств устанавливается нормативный срок службы, фактически равный их назначенному сроку службы и представляющий собой период амортизации объекта. В отечественной практике субъекты хозяйствования имеют право корректировать установленную величину нормативного срока службы, устанавливая по своему усмотрению срок полезного использования объекта, фактически равный  $T_{исх}$ . Все корректировки закрепляются в учетной политике организации, которая самостоятельно определяет способы и методы начисления амортизации. Для объектов основных средств, не участвующих непосредственно в производственном процессе, принимается линейный способ начисления амортизации [11]:

$$Z_{аморт.кор} = \frac{Z_{аморт}}{\alpha_{св}}, \quad 1 < \alpha_{св} \leq 1,5, \tag{12}$$

где  $\alpha_{св}$  – коэффициент увеличения срока полезного использования светильников.

Аналогично можно откорректировать затраты на ремонтно-эксплуатационное обслуживание:

$$Z_{\text{обсл.кор}} = \frac{Z_{\text{обсл}}}{\alpha_{\text{ис}}}, \quad \alpha_{\text{ис}} > 1, \quad (13)$$

где  $\alpha_{\text{ис}}$  – коэффициент увеличения срока полезного использования источников света.

Подставив (12) и (13) в (11), получаем условие экономической эффективности предлагаемой методики на этапе проектирования:

$$Z_{\text{аморт}} \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{\text{св}}} \right) + Z_{\text{обсл}} \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{\text{ис}}} \right) > Z_{\text{доп}}. \quad (14)$$

Выражение (14) показывает, что увеличение срока службы осветительного оборудования должно быть достаточно существенным, чтобы превысить уровень дополнительных затрат.

Отметим, что применение выражений (9)–(14) для расчета эксплуатационных затрат на этапе проектирования возможно только при наличии достаточно адекватных статистических данных о параметрах  $\alpha_{\text{св}}$  и  $\alpha_{\text{ис}}$ , которые могут быть получены, в свою очередь, только на этапе эксплуатации.

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика позволяет оптимизировать работу систем освещения таким образом, что при некотором возрастании потребления электроэнергии общие затраты на эксплуатацию осветительной установки с учетом затрат на потребляемую электроэнергию могут быть снижены.

2. Максимальное количество коммутаций осветительной установки по критерию минимума финансовых затрат зависит от суммарной длительности нахождения этой установки во включенном состоянии, а также от мощности установки и стоимости электроэнергии.

3. Повысить эффективность эксплуатации электрических светильников можно, используя как организационные, так и технические мероприятия.

4. После внедрения предлагаемой методики в части цеха производства пластмассовых изделий № 1 ЗАО «Легпромразвитие» г. Бобруйска затраты на ремонтно-эксплуатационное обслуживание ламп уменьшились в 3 раза.

5. Повсеместное внедрение предложенной методики позволит снизить значение расчетных эксплуатационных затрат на этапе проектирования осветительной установки.

### Литература

1. Буторин, В. А. Детерминированная математическая модель надежности светодиодных светильников / В. А. Буторин, К. П. Вовденко // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 5. – С. 76–78.
2. Tonzani, S. Lighting technology: time to change the bulb / S. Tonzani // Nature. – 2009. – #459. – P. 312–314.
3. Unger, S. How much security for switching a light bulb / S. Unger, S. Pfeiffer, D. Timmermann // Wireless Communications and Mobile Computing Conference. – 2012. – P. 1034–1039.

4. Lim, S-R. Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp, and Light-Emitting Diode Bulbs / S-R. Lim // Environmental Science & Technology. – 2013. – № 47. – P. 1040–1047.
5. Тукшаитов, Р. Х. О заявляемых и реальных значениях срока службы светодиодных светильников и ламп / Р. Х. Тукшаитов, И. Айхайти // Энергетика Татарстана. – 2013. – № 4. – С. 55–58.
6. Козловская, В. Б. Влияние напряжения на основные характеристики ламп электрического освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, И. В. Колосова // Энергетика. Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. – 2009. – № 1. – С. 6–13.
7. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий. – Минск : Департамент по энергоэффективности, 2016. – 106 с.
8. Утилизация (обезвреживание) отработанных ламп. ООО «ДЕМИД Сервис». – 2017. – Режим доступа: <http://www.ecoservis.by>. – Дата доступа: 04.01.2017.
9. Надежность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002–2015. – Введ. 01.03.17. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2017. – 23 с.
10. Об установлении нормативных сроков службы основных средств и признании утратившими силу некоторых постановлений Министерства экономики Республики Беларусь : постановление М-ва экономики Респ. Беларусь, 30 сент. 2011 г., № 161 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь – 2011. – № 129. – 8/24359. – С. 26–87.
11. Инструкция о порядке начисления амортизации основных средств и нематериальных активов : утв. постановлением М-ва экономики Респ. Беларусь, М-ва финансов Респ. Беларусь и М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 27.02.2009 : текст по состоянию на 6 мая 2014 г. – 44 с.

*Получено 14.09.2017 г.*