

Начало в № 1'2014

Управление освещением открытых пространств

Часть 3

Продолжаем начатый в предыдущих номерах журнала анализ эволюции искусственного освещения открытых пространств с позиции практической системологии. Переходим к эпохе интеллектуального освещения.

К вопросу о целеполагании

Результатом целеполагания должно стать снижение совокупной стоимости владения решением [1].

Предисловие

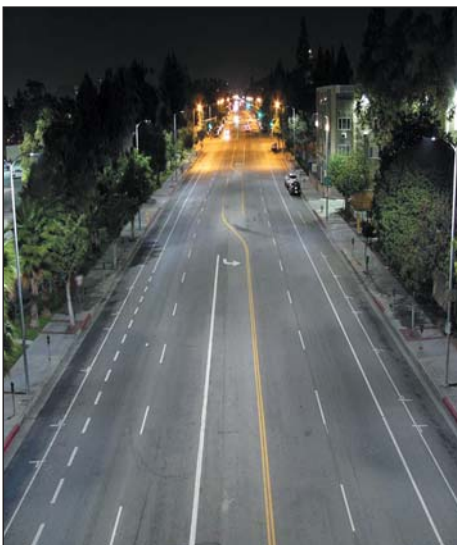


Рис. 1. Освещение Лос-Анджелеса

Казалось бы, в деле освещения больших городских территорий в наше время цели предельно ясны и задачи определены. Более того, на протяжении нескольких столетий этот вопрос находил успешные решения в различных вариантах, соотносящихся с возрастающими потребностями и следующим за ними прогрессом источников света, чему были посвящены первые две части настоящей статьи. Современные требования к искусственному освещению городской среды исходят из того, что света в ночном городе должно быть достаточно для комфорта пеше-

ходов и безопасности движения транспорта на дорогах. Все необходимые характеристики наружного освещения детализированы в основополагающих документах: СНиПах, СП и ГОСТах. С точки зрения управления также все кажется достаточно простым: включать и выключать свет требуется с заходом и восходом солнца соответственно, что в наше предельно автоматизированное и электрифицированное время легко делается либо по астрономическим часам, либо по датчику освещенности. Остается только приобрести самые современные энергосберегающие светильники, модернизировать коммутационную аппаратуру, наставить счетчиков электроэнергии — и мы получим современную интеллектуальную систему освещения.

Собственно говоря, примерно так и создавалась самая совершенная на настоящий момент, как считает ряд аналитиков, светодиодная система освещения Лос-Анджелеса, города — побратима Санкт-Петербурга. Она получила поддержку фонда бывшего президента США Б. Клинтона и министерства энергетики США (Department of Energy — DOE), а также была одобрена ассоциацией крупнейших сорока мировых мегаполисов по вопросам климата (Cities Climate Leadership Group — C40).

За четыре года в Лос-Анджелесе было установлено более 140 тыс. светодиодных светильников от нескольких производителей и внедрена система, управляющая работой светильников и контролирующая энергопотребление (Smart Metering). Теперь большая часть города освещена белым светом светодиодов (как на переднем плане рис. 1), а оплата электроэнергии стала производиться не по суммарной установленной мощности светильников и времени их горения, а по объективным показателям счетчиков.

Модернизация коснулась в первую очередь тех кварталов и улиц Лос-Анджелеса, которые

можно было осветить относительно маломощными светильниками (до ≈10 тыс. лм каждый). Во вторую очередь проводится замена более мощных натриевых светильников на крупных городских магистралях. На следующем этапе множество нестандартных светильников архитектурно-художественной подсветки также будет переведено с газоразрядных ламп высокого давления (ЛВД) на светодиодные.

Аналогичные проекты реализуются в других крупнейших городах Калифорнии — Сан-Франциско и Пало-Альто, в Анкоридже на Аляске, в Квебеке (Канада), в Осло (Норвегия) и ряде европейских городов. Очевидно, что таким масштабным программам необходимо полное технико-экономическое обоснование с учетом всех видов расходов на протяжении жизненного цикла системы освещения с возможностью сравнения с альтернативными вариантами систем. Однако инициаторы этих проектов ограничиваются, как правило, подсчетом срока окупаемости начальных затрат от экономии электроэнергии по отношению к существующим, морально и физически устаревшим системам и не пытаются охватить проблему во всей ее полноте. Достаточно сказать, что возможные альтернативные варианты систем даже не предлагаются.

Для обеспечения всесторонности анализа начнем с рассмотрения известных и гипотетических возможностей энергосбережения в системах городского освещения как с ЛВД, так и со светодиодами.

Возможности энергосбережения

*...в подлинном движении к истине
есть изначальное откровение смысла,
солнечный свет, падающий сверху
на лестницу познания...
но современная душа
все еще страдает светобоязнью...*

Н. Бердяев [2]

Появление в 1960-х годах энергоэффективных натриевых ламп высокого давления (НЛВД)

на долгие годы определило желто-оранжевый вид городского освещения (задний план на рис. 1), а также и основное направление энергосбережения — замену широко применявшихся до этого ртутных ламп высокого давления (РЛВД) на НЛВД. Тем не менее в Санкт-Петербурге и Москве доля НЛВД в уличном освещении лишь недавно стала близкой к 100%; в других городах России (таблица) этот процесс еще далек от завершения [3]. Что касается более современных светильников с металлогалогенными лампами (МГЛ) и со светодиодами (LED), они используются в небольших количествах в архитектурно-художественной подсветке и в малочисленных пилотных проектах.

В качестве единственной дополнительной возможности энергосбережения на протяжении десятилетий предлагалось выключение части светильников в ночное время при уменьшении интенсивности движения автотранспорта. Обычно это осуществлялось простейшим способом: отключением одной или двух из трех фаз, питающих каждую линию освещения [4], с выключением соответственно 1/3 или 2/3 светильников.

Такая технология позволяла уменьшить среднегодовое энергопотребление системы освещения на 10% при отключении одной фазы и на 20% при отключении двух фаз, но требовала увеличения количества коммутаций, сокращала срок службы ламп, повышала асимметрию нагрузки и потери в распределительных сетях, снижала надежность работы системы. Кроме этого, пофазное отключение вызывало недовольство водителей и Госавтоинспекции ввиду большой неравномерности дорожного освещения, ухудшающей видимость на ночной дороге, повышающей утомляемость водителей и увеличивающей аварийность. В результате в 1994 году такое энергосбережение было признано нецелесообразным [5] и отменено сначала в Москве, а затем и в Санкт-Петербурге [6]. Однако до 2010 года эта энергосберегающая технология считалась допустимой в руководящем документе по естественному и искусственному освещению — СНиП 23-05-95 (п. 7.44) [7]. Исключение метода пофазного отключения было законодательно закреплено в актуализированной редакции этого документа — СНиП 23-05-2010, а затем и в своде правил по эксплуатации сетей освещения СП 52.13330.2011 [8].

Такое развитие событий позволяет сделать заключение о том, что не каждое энергосберегающее мероприятие, даже дающее существенную экономию, может быть признано полезным. Действительно важным является получение интегрального экономического эффекта от внедрения новой технологии, на сути расчета которого остановимся ниже.

Основным способом энергосберегающего управления в действующей редакции СНиП 23-05-2010 признан способ регулирования светового потока светильников (диммирование). При этом в ночном режиме работы системы освещения считается допустимым диммирование на 50% от номинального

Таблица. Типы ламп, применяемых в городском освещении России (данные 2012 г.)

| Вид лампы | Средняя доля ламп (%) по городам с населением (тыс. чел.) | | |
|-----------|---|---------|------|
| | 50-100 | 100-500 | >500 |
| ЛН* | 7 | 6 | <5 |
| РЛВД | 55 | 48 | 28 |
| НЛВД | 38 | 46 | 67 |
| МГЛ | около 0 | около 0 | до 1 |
| LED | | <1 | |

Примечание. *В ряде городов доля ламп накаливания (ЛН) доходит до 50–70%.

светового потока в вечернем режиме. В простейшем варианте ночной режим устанавливается городскими властями по времени (например, от 1 до 6 часов ночи). Может быть предусмотрен и другой вариант регулирования светового потока, непосредственно связанный с обеспечением безопасности дорожного движения. В этом варианте снижение освещенности дорожного полотна на 30% и на 50% предлагается проводить при уменьшении интенсивности движения автомобилей в 3 и 5 раз соответственно. Причем снижение яркости светильников при низких интенсивностях движения транспорта должно благоприятно сказываться на безопасности ввиду уменьшения ослепляющего воздействия на водителей. Возможности такого диммирования проиллюстрированы графиками на рис. 2. Отметим, что так называемое традиционное управление (пунктирная линия) обеспечивает только включение и выключение НЛВД с электромагнитным балластом (ЭБ) без какого-либо ночного режима, при этом энергопотребление может даже несколько увеличиваться с обычным ночным возрастанием напряжения питания в городских электросетях.

Характерно, что первоначально реализация диммирования в наружном освещении осуществлялась переключением режимов работы ламп. Первым таким способом было уменьшение светового потока ЛВД в каждом светильнике за счет подключения в ЭБ дополнительного дросселя в ночном режиме. При этом суммарное энергосбережение можно довести до 20%. Однако существенное

снижение надежности и уменьшение срока службы ламп не позволили данному способу найти широкое применение.

Второй технологией энергосбережения при питании ЛВД через ЭБ явилась технология регулирования общего напряжения питания светильников, использующая питающий автотрансформатор с переключающимися обмотками (автотрансформаторный регулятор). Этим способом можно было добиться снижения энергопотребления также до 20%. В Санкт-Петербурге первый образец подобной осветительной установки проходил опытную эксплуатацию еще в начале 1980-х годов (П. М. Шевкоплясов).

Оба метода использовали для коммутации силовые реле и не получили широкого распространения ввиду низкой эксплуатационной надежности. В дальнейшем применение полупроводниковых силовых ключей (тиристоров и симисторов) позволило их модернизировать, они чаще применялись, но вскоре появились более эффективные технологии энергосбережения [9], основанные на широком распространении электроники в светильниках.

Необходимо отметить, что регулирование напряжения питания линий освещения естественным образом обеспечивает стабилизацию мощности ламп в рабочем режиме, а это сказывается не только на энергосбережении, но и на сроке службы ламп, и важно для получения дополнительного экономического эффекта. Действительно, как уже отмечалось, ночью в городских электросетях нередко превышения напряжения над номинальным значением, доходящие до 15%,



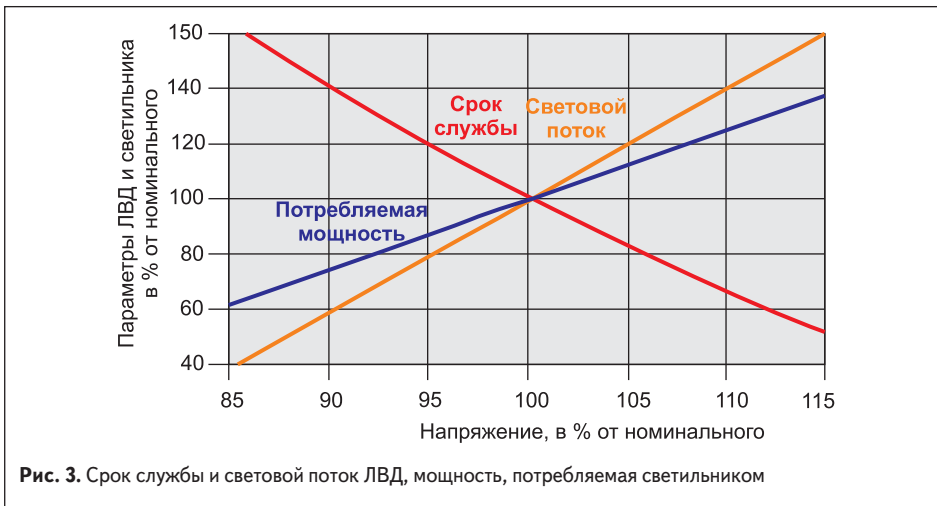


Рис. 3. Срок службы и световой поток ЛВД, мощность, потребляемая светильником

при которых срок службы ЛВД уменьшается (рис. 3) до двух раз [4].

Современные же методы энергосбережения в сетях освещения с ЛВД основаны на использовании вместо ЭБ управляемой электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭПРА), которая обеспечивает улучшение ряда важных характеристик сетей освещения традиционного исполнения, в том числе:

- потребление электроэнергии может быть уменьшено до 40% за счет более эффективного преобразования энергии и управления яркостью светильников;
- обеспечена высокая стабильность управляемого светового потока, в том числе при изменениях сетевого напряжения;
- уменьшена деградация ламп и более чем вдвое увеличен срок их службы [9];
- уменьшены сечения проводов и затраты на прокладку сетей;
- обеспечена возможность полной оперативной диагностики светильников;
- увеличен важнейший отчетный показатель организаций, эксплуатирующих городское освещение, — так называемый процент горения;

- пусковые токи сети освещения снижаются до уровня, не превышающего номинальный ток.

Как известно, в традиционных сетях освещения со светильниками с ЛВД и ЭБ пусковые токи превышают значение номинального тока примерно в два раза в течение нескольких минут, требующихся для разогрева ламп. Устранение пускового тока увеличивает надежность сети и позволяет уменьшить сечение проводов.

Один из первых пилотных проектов такой системы с управлением не только ламповыми, но и светодиодными светильниками внедрен в Челябинске. Ряд аналогичных проектов внедряется в Омске, Екатеринбурге, Шахтах и Тюмени.

Более углубленные исследования [9] показали, что диапазон регулирования мощности источников света в зависимости от всех возможных факторов следовало бы существенно увеличить. Действительно, только коэффициент запаса по световому потоку при вводе линии освещения в эксплуатацию необходимо задавать на уровне $K_3 = 1,5 \dots 1,6$. Этот запас необходим для обеспечения светового потока

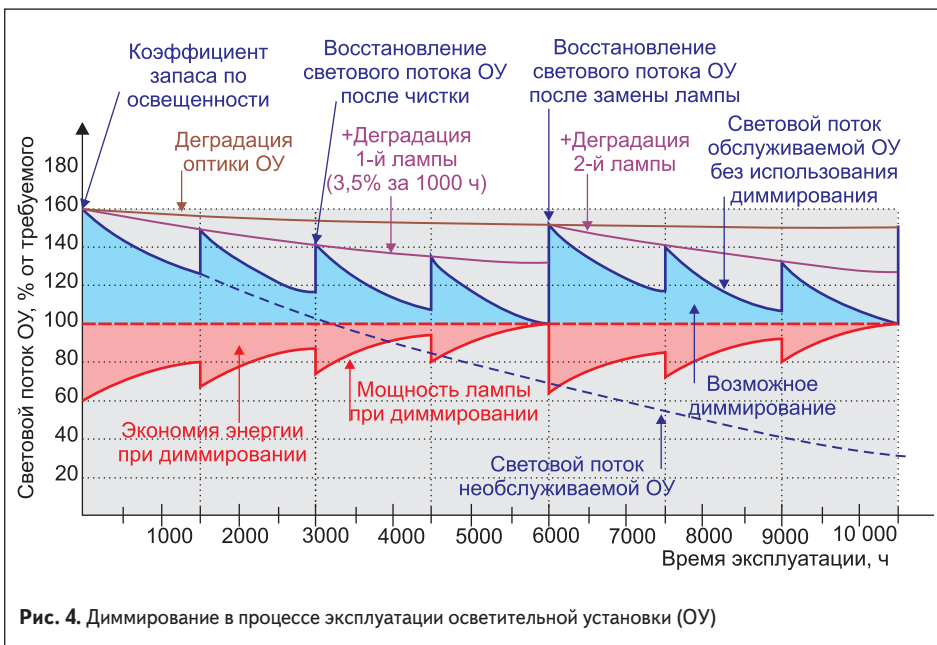


Рис. 4. Диммирование в процессе эксплуатации осветительной установки (ОУ)

не ниже номинального в течение времени между чистками светильников.

На рис. 4 показано, что первоначальное диммирование с устранением излишка света и дальнейшее увеличение мощности (по мере известной загрязняемости защитного стекла светильника [10]) дает существенное энергосбережение. Как видно на рисунке, при избранном подходе также компенсируется деградация источника света и оптики. С учетом перечисленных факторов дополнительное энергосбережение без каких-либо значительных материальных затрат может составить еще 15–20%.

Для реализации такого управления нам потребуется источник света с коэффициентом диммирования, превышающим $K_d = 2$, считавшийся ранее вполне достаточным. Теперь уже нужен $K_d > K_3 \times 2 = 3,2$. Здесь под K_d мы понимаем соотношение между максимальным и минимальным световым потоком источника света (лампы).

На рис. 5 представлены характеристики диммирования современных источников света, используемых в наружном освещении, включая редко применяемые серные лампы (СР) и безэлектродные МГЛ (БМГЛ).

Легко убедиться в том, что при энергосберегающем управлении светильники со светодиодами получают весомое преимущество по отношению к светильникам с любыми другими источниками света. Данное преимущество определяется реализацией большого диапазона диммирования и существенным увеличением энергоэффективности при сниженных световых потоках. Для ЛВД же наблюдается обратная картина — при уменьшении светового потока в два раза светоотдача падает в среднем в полтора раза.

Интегральная оценка эффективности уличного светодиодного светильника должна учесть и лучшее использование светодиодов для получения кривой светораспределения (КСС) широкого типа (Ш), необходимой для равномерного освещения дорожного покрытия. Кроме этого важно, что по спектральному составу излучения светодиодные источники имеют преимущества перед наиболее энергоэффективными натриевыми лампами. Это достигается за счет того, что специально подобранные характеристики люминофора лучше соответствуют спектральным характеристикам чувствительности человеческого глаза, чем желто-оранжевое излучение паров натрия.

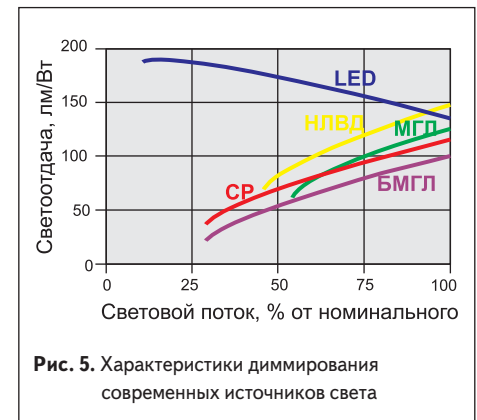


Рис. 5. Характеристики диммирования современных источников света

С учетом энергосберегающего управления и всех перечисленных факторов энергоэффективность светодиодного светильника может вдвое превысить аналогичный параметр светильника с НЛВД.

Особо следует отметить, что до недавнего времени в освещении железных дорог России ввиду повышенных требований по безопасности применялись исключительно РЛВД. Поэтому проведение современных энергосберегающих мероприятий дает дополнительные преимущества. Однако в регламентах РЖД отсутствует возможность диммирования, которая пригодилась бы для интеллектуального управления светильниками. Так, освещение пассажирских платформ во время прибытия, стоянки и отправления поездов можно было бы регламентировать на более высоком уровне, чем в отсутствие этих событий.

К сожалению, впечатляющие возможности энергосбережения в городском освещении частично нивелируются более низкими ночными тарифами на электроэнергию. Уменьшение тарифов вызвано тем, что естественное ночное падение энергопотребления не может быть эффективно отработано оперативным сокращением генерируемой мощности на современных тепловых и атомных электростанциях из-за снижения их энергоэффективности в таких режимах. Возможность оперативного регулирования генерации электроэнергии присуща только гидроэлектростанциям, но они производят не более 1/5 электроэнергии всей страны. Современная же возобновляемая энергетика (солнечная и ветровая), широко распространенная в Европе, вообще генерирует электроэнергию непостоянно и с большими перепадами. Это требует применения мощных энергонакопителей, в качестве которых чаще всего применяются гидроаккумулирующие электростанции [11]. Такую структуру генерации могут себе позволить только страны, наиболее передовые в развитии энергетике, такие как Дания и Норвегия.

Возможности ресурсосбережения

Благоприятная возможность скрывается среди трудностей и проблем.
Альберт Эйнштейн

Используя перечисленные возможности энергосбережения, не стоит пренебрегать и другими способами получения экономического эффекта. Так, применяя системный подход к сбережению различного рода ресурсов, можно получить следующие преимущества:

- увеличение ресурса работы источников света в результате стабилизации питающего напряжения (рис. 3);
- увеличение срока службы светодиодов при диммировании;
- увеличение ресурса работы ламп до двух раз за счет применения более совершенных источников света, таких как двухгорелочные лампы;
- уменьшение затрат на прокладку линии освещения;
- повышение надежности светильников и аппаратуры пунктов питания.

Все это может существенно снизить затраты на обслуживание систем освещения.

Могут использоваться и довольно редкие в наше время мероприятия, которые имеют на первый взгляд неочевидное комплексное воздействие как на энерго-, так и на ресурсосбережение. Например, применение самоочищающегося покрытия защитного стекла светильника дает ощутимый прирост экономического эффекта за счет увеличения не только интервала между чистками светильников, но и реального срока службы ламп. Этот эффект достигается несмотря на то, что такое покрытие ухудшает начальный коэффициент светопропускания защитного стекла на 5–7%.

Как показано в [9], оценка получаемой экономии от ресурсосбережения за все время эксплуатации системы освещения сравнима с экономией от снижения энергопотребления.

Вывод

Требуется тщательнейший анализ как существующих, так и перспективных возможностей технологий наружного освещения для объективного подсчета суммарного экономического эффекта от внедрения каждой технологии, что позволит осуществить выбор самой «правильной» из них.

О реализации возможностей

Необходимо видеть перед собой неизмеримую область возможного, а не считать возможным только то, что уже есть.
Д. Дидро,
иностраннный почетный член
Петербургской академии наук

Возможные технологии энергоресурсосбережения

В контексте обсуждения возможностей мы перечислили практически все существующие приемы, методы и технологии, способные оказать положительное влияние на энергоресурсосбережение в сетях освещения. Из этих технологий в нашем перечне достойные места занимают LED-технологии, технологии с ЛВД и управляемыми ЭПРА, а также технологии с двухрежимными ПРА и с автотрансформаторными регуляторами. Все они дают существенное энергосбережение и, как будет показано ниже, превосходят традиционные сети с ЛВД+ЭБ по интегральным экономическим показателям.

Обсуждая известные технологии энергоресурсосбережения, мы оставили без внимания единственную не реализованную до настоящего времени технологию. Она явилась результатом исследования, направленного на получение максимального энерго- и ресурсосбережения [12]. Концепция, на которой базируется эта технология, первоначально считалась альтернативной всем существующим.

Суть предложенной концепции заключается в следующих основных положениях [13]:

- электрическая сеть освещения из трехфазной четырехпроводной преобразуется в трехпроводную биполярную сеть постоянного тока (Direct Current — DC);

- из драйверов LED-светильников и из ЭПРА светильников с ЛВД изымаются выпрямители и корректоры коэффициента мощности (ККМ) с выходными конденсаторами, так что управляемый выходной каскад драйвера (или ЭПРА) получает электропитание непосредственно от DC-сети;
- на электроподстанции (или в пункте питания) устанавливается силовой выпрямитель, преобразующий сетевое переменное трехфазное напряжение в постоянное напряжение питания сети освещения;
- управление светильниками осуществляется по технологии передачи высокочастотного сигнала по силовой сети (Power Line Communication — PLC), которая в такой DC-сети имеет определенные преимущества.

Эта концепция была названа автором технологической платформой интеллектуальной системы освещения на постоянном токе (Direct Current Lighting Smart Grid — DC LSG). Необходимо отметить, что в последние годы DC-сети нашли развитие во многих областях, в том числе в крупных серверных центрах, DC-умных домах, энергосистемах коммерческих зданий и кораблей, в солнечных электростанциях, на электроподстанциях (напряжение собственных нужд), наконец, в сетях аварийного освещения [11].

В качестве одного из преимуществ DC LSG рассмотрим переход на питание постоянным током драйвера LED-светильника. На рис. 6 показан драйвер одного из ведущих отечественных производителей, предназначенный для питания от переменного напряжения светодиодного светильника мощностью 150 Вт.

Он состоит из четырех функциональных модулей, а именно входного фильтра (1), однофазного выпрямителя (2), ККМ (3) и выходного конвертера (4). При питании постоянным напряжением нам не потребуются ни выпрямитель, ни ККМ. Это позволит существенно уменьшить габариты и стоимость, а также увеличить надежность драйвера.

Переход к питающей сети постоянного напряжения предполагает применение высокоэффективного трехфазного силового выпрямителя взамен полтора сотен однофазных выпрямителей и ККМ в светильниках. Обычно однофазный выпрямитель содержит матрицу из четырех полупроводниковых диодов, а ККМ — один диод и один транзистор. Немного упрощая, можно сказать, что 900 (150×6) маломощных полупроводниковых приборов в светильниках могут быть заменены одним трехфазным

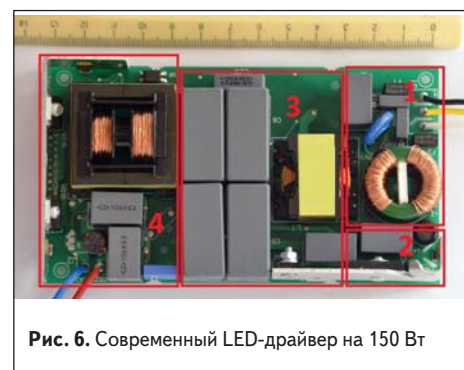


Рис. 6. Современный LED-драйвер на 150 Вт

выпрямителем в пункте питания, состоящем из шести силовых диодов (например, по схеме А. Н. Ларионова). Таким образом происходит снижение стоимости и повышение надежности светильников и линии освещения в целом. Уменьшается также количество проводов в линии с четырех до трех.

При питании постоянным током обеспечивается и более эффективная передача по силовой сети PLC ввиду отсутствия конденсаторов, компенсирующих коэффициент мощности (обязательных для светильников с ЛВД и ЭБ), и помех от импульсного ККМ (в светильниках с ЭПРА и драйверами). Не самый удачный опыт первых отечественных пилотных проектов с управляемыми ЭПРА показал, что сложности реализации PLC в сети переменного напряжения не были преодолены в полной мере.

Весьма важно и то, что в DC-сетях обеспечивается повышенная электробезопасность для обслуживающего персонала, поскольку постоянное напряжение безопаснее переменного [14]. Существенно уменьшается также вероятность поражения домашних животных (собак) от шагового напряжения токов утечки.

Очевидно, что заявленная технологическая платформа DC LSG в большей степени регламентирует вопросы электропитания, управления и связи, предполагая применение всех существующих и будущих энергоэффективных источников света.

В настоящее время можно считать, что единственным реальным фактором, мешающим внедрению DC LSG, является наличие сторонних потребителей, питающихся непосредственно от линий освещения традиционным одно- или трехфазным переменным напряжением. Однако большинство этих потребителей представляют собой рекламные стенды с подсветкой, которым тип питающего напряжения должен быть безразличен. Многие другие современные нагрузки имеют универсальное напряжение питания. В случае крайней необходимости возможно применение преобразователя (конвертера) постоянного напряжения в переменное. Таким образом, очевидно, что при рассмотрении вопроса о переходе на DC LSG наличие сторонних потребителей не должно иметь абсолютного приоритета. Более того, этот переход может способствовать упорядочению подключений к сетям освещения.

Возможность питания сетей освещения от постоянного напряжения введена в проект общероссийского стандарта «Автомобильные дороги общего пользования. Искусственное освещение. Нормы и методы расчета», разработанного ООО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский светотехнический институт им. С. И. Вавилова» (ООО «ВНИСИ»).

Об управляемости, диагностике и связи

Управляемость сети освещения подразумевает выполнение диммирования светильников по заранее заложенным сценариям с учетом конкретных условий работы линий освещения. В этих сценариях, кроме ежедневного изменения времени перехода на ночной режим и об-

ратно в соответствии с восходами и закатами солнца, следует учитывать еще ряд факторов. Среди них отметим корректировку режимов при уменьшении интенсивности дорожного движения; сохранение в ночном режиме повышенного светового потока у отдельных светильников (на пешеходных переходах, остановках общественного транспорта и пр.); обеспечение особых режимов при проведении различных мероприятий и при ликвидации крупных аварий; обеспечение парирования частичных отказов в светильниках и т. п. Реализация данных сценариев требует надежной связи с каждым светильником путем создания информационной сети с ячеистой топологией (Mesh Topology). В такой сети может быть достигнута высокая отказоустойчивость за счет шифрации с возможностью восстановления ошибок, самоконфигурирования сети и ее самовосстановления, а также маршрутизации и ретрансляции в каждом узле. В современных системах освещения Mesh-сеть может быть создана на базе беспроводных и проводных технологий. Среди проводных технологий наиболее перспективны варианты PLC-технологий, такие как G3 PLC и PRIME. Среди беспроводных технологий наиболее продвинутой в целях автоматизации является ZigBee.

Обеспечение управляемого диммирования с учетом интенсивности движения автотранспорта возможно как с помощью датчика дорожного движения в составе АСУ наружного освещения (АСУНО), так и по показаниям датчиков, входящих в интеллектуальную городскую транспортную систему. Не запрещено и использование статистических данных.

Необходимо отметить, что при наличии двусторонней связи со светильниками появляется возможность оперативного получения диагностики, необходимой эксплуатирующему предприятию. Диагностика предусматривает фиксацию местоположения отказавших светильников с привязкой к карте города, подсчет объективного значения «процента горения» по каждому пункту питания, эксплуатационному району и городу в целом с разбиением на классы магистралей. Немаловажна и предотказная диагностика. Такая информация является важнейшей для диспетчерской службы, технического отдела и районных отделений при планировании и управлении ходом ремонтно-восстановительных работ.

Автор считает неконкурентоспособными ряд методов управления светильниками, применяемых в отдельных пилотных проектах систем освещения. Отметим следующие отвергнутые варианты: управление светильниками по дополнительно прокладываемым проводам; одностороннее управление по PLC, основанное на введении разного рода управляемых искажений в кривые переменного напряжения; автономное управление с помощью фотодатчиков, ненадежное в наших погодных условиях (недостатки этого варианта подробнее будут рассмотрены ниже).

Важно учесть то, что интеллектуальная система освещения с управляемыми све-

теильниками меняет подход к диагностике на уровне пунктов питания и увеличивает возможности в поиске неисправностей в сетях. Так, в системах управления городским освещением первых поколений широко применяется контроль целостности предохранителей в пункте питания, который заключается в измерении уровня нескольких десятков напряжений, поступающих в отходящие от пункта питания линии освещения. В системах следующих поколений часто применяется контроль энергопотребления по каждому отходящему фазному проводу. Диагностика работы светильников не только устраняет необходимость таких методов контроля, требующих дополнительных проводных подключений, но и обеспечивает проверку целостности линий освещения с точностью до опоры.

В интеллектуальной системе управления оперативно и с высокой точностью обеспечивается также контроль несанкционированных подключений путем непосредственного измерения дополнительной потребляемой мощности.

В случае же санкционированных подключений в пункте питания (например, питание светофоров) и непосредственно на линиях освещения (в частности, питание рекламных стендов и т. п.) учет электроэнергии наиболее целесообразно проводить счетчиками со встроенными PLC-модемами с передачей информации в контроллер пункта питания и далее на сервер диспетчерской службы.

В этой связи актуально объединение коммерческого и технического учета электроэнергии для устранения избыточности, снижения цены решения, а также повышения достоверности и оперативности контроля.

Таким образом, в первых АСУНО основным объектом управления были контакторы, а основным объектом диагностики — предохранители. В интеллектуальных АСУНО объектами управления и диагностики становятся светильники, то есть контроль максимально приближен к конечному результату — освещению дороги.

Необходимо отметить, что срок жизни технологии управления городским освещением весьма велик. Так, с начала внедрения в Санкт-Петербурге первых образцов приборов АСУНО «АВРОРА» прошло более 15 лет. АСУНО «АВРОРА» претерпела за это время ряд модернизаций, вызванных возрастающими потребностями и изменениями в руководящих документах, касающихся методов управления и энергосбережения. Вот почему при разработке интеллектуальной системы управления чрезвычайно важно предусмотреть дальнейшую модернизацию, которая позволила бы реализовывать вновь возникающие сценарии управления, использовать новые источники света и наращивать возможности управления и диагностики.

Очевидно, что в такой пионерской работе нам не помогут методы технической разведки и «обратного инжиниринга», столь необходимые 90 лет назад при создании первых отечественных ламп накаливания [15].

Сравнение вариантов

...нововведения необходимы, но необходима и проверка их со стороны пользы.
П. К. Энгельмейер [16]

В наше время каждая новая интервенция энергоресурсосберегающих технологий связана, как правило, с внедрением более дорогих решений, увеличивающих начальные затраты, но дающих (или обещающих) уменьшение эксплуатационных расходов. Ввиду этого важно выработать общепонятный критерий для сравнения различных энергоресурсосберегающих проектов. Совершенно очевидно, что любого рачительного хозяина, эксплуатирующего систему городского освещения, не может удовлетворить критерий минимальной стоимости внедрения проекта, часто являющийся единственным при проведении тендеров по госзакупкам. Оценка по минимальному сроку окупаемости, обычно используемая в упрощенных экономических расчетах эффективности внедрения инновационных технологий, также не может быть признана достаточно убедительной. Действительно, как показано в [9], при одинаковом сроке окупаемости более выгодной следует признать, как это ни покажется странным, технологию с максимальными начальными затратами, поскольку после завершения срока окупаемости она приносит наибольший доход. В [9] автор предложил использовать для сравнения проектов освещения хорошо известный способ оценки инноваций — сравнение по ТСО (Total Cost of Ownership), для которого общепринятым, но не совсем удачным переводом на русский язык является термин «совокупная стоимость владения». Достоверный расчет по ТСО дает интегральную оценку за весь назначенный срок жизни инновационной технологии. В упрощенном варианте расчетов, для сокращения количества учитываемых факторов и снижения трудоемкости вполне допустимо провести сравнение по критерию чистого дисконтированного дохода (ЧДД). При этом учитываются начальные затраты, эксплуатационные расходы, плата за электроэнергию, а также прогноз увеличения текущих расходов до конца назначенного срока службы системы. Существенным упрощением расчетов является то, что нам будет достаточно учитывать разницу в затратах по отношению к «базовому» варианту, за который естественно принять широко используемую в России технологию освещения на НЛВД с ЭБ без пофазного отключения в ночном режиме. При проведении НИОКР по интеллектуальной АСУ наружного освещения «АВРОРА+» группой сотрудников ОАО «НИИ точной механики» в 2012 году была проведена переоценка экономической эффективности всех возможных мероприятий по энергоресурсосбережению в перечисленных технологиях, первоначально сделанная в 2010 году [11, 12]. Расчет проводился в привязке к участку освещения Западного скоростного диаметра Санкт-Петербурга длиной 2 км, содержащего 328 светильников и 2 пункта питания. Назначенный срок эксплуатации системы освещения принят равным 12 лет, он близок к нормативному сроку эксплуатации до капитального ремонта. При проведении расчетов предполагалось, что все

варианты систем выполнены на самом высоком уровне с применением современной элементной базы без использования малонадежных элементов с коротким временем жизни (таких как электролитические конденсаторы [9]). Результаты сравнительных расчетов представлены на рис. 7. Наглядно показано, что при использовании критерия минимальной начальной стоимости проекта для выбора энергосберегающей технологии нам придется выбирать между технологией с двухрежимными ПРА и технологией с автотрансформаторными регуляторами. Если пользоваться критерием минимального срока окупаемости, то у всех рассмотренных технологий эта характеристика примерно одинакова и небольшим преимуществом обладает технология управляемых светильников с ЛВД и ЭПРА на существующих линиях переменного тока.

Критерий ТСО, то есть максимального дохода за назначенный срок эксплуатации, показывает преимущество вариантов управляемых светодиодных и ЛВД-светильников в сетях постоянного напряжения (LED+DC и ЛВД+DC). Небольшая разница между этими технологиями не превышает методической погрешности. При подведении результатов исследования обе технологии были объединены в единую технологическую платформу интеллектуальной сети освещения на постоянном токе DC LSG.

Предстоящее создание интеллектуальной системы освещения ставит перед разработчиками ряд новых задач. Среди них отметим формирование современной PLC Mesh-сети для управления светильниками; нормирование характеристик электромагнитной совместимости светильников различных производителей с PLC Mesh-сетью; создание резервированной городской системы связи пунктов питания с диспетчерской; разработку высоконадежных управляемых драйверов и ЭПРА для функционирования в сложных условиях эксплуатации и т. п. В частности, перед силовой электроникой стоит задача расширения номенклатуры и улучшения характеристик MOSFET-транзисторов

в диапазоне средних напряжений 300–400 В для создания более совершенных ЭПРА и драйверов светодиодов.

На технологической платформе DC LSG вполне логичным выглядит пересмотр концепций аварийного и бесперебойного освещения. Очевидно, что для реализации системы аварийного освещения повышенной надежности достаточно будет в состав DC LSG включить накопитель (аккумулятор), не используя каких-либо преобразований из переменного напряжения в постоянное и обратно, как это делается в традиционных источниках бесперебойного электропитания. Дополнительное подключение дизельного или газового электрогенератора позволит также создавать на этой технологической платформе эффективную систему бесперебойного освещения длительного действия с возможностью оперативного управления.

Таким образом, следует констатировать, что развитие управляющей и силовой электроники привело к изменению оценки эффективности трехфазного энергоснабжения сетей освещения, которое считалось «естественным» и единственно возможным в течение более 100 лет. В рамках концепции DC LSG предполагается возврат к более энергоэффективным и удобным интеллектуальным биполярным сетям постоянного напряжения, изобретенным еще в конце XIX века.

Некоторые уроки освещения Лос-Анджелеса

Истины надо доискиваться даже там, где не предвидится от нее никакой пользы, потому что польза может оказаться и обнаружиться там, где ее и не ожидали.
А. Шопенгауэр

В качестве основного тренда модернизации городского освещения бюро освещения Лос-Анджелеса заявило замену светильников с НЛВД на светодиодные. Была проделана

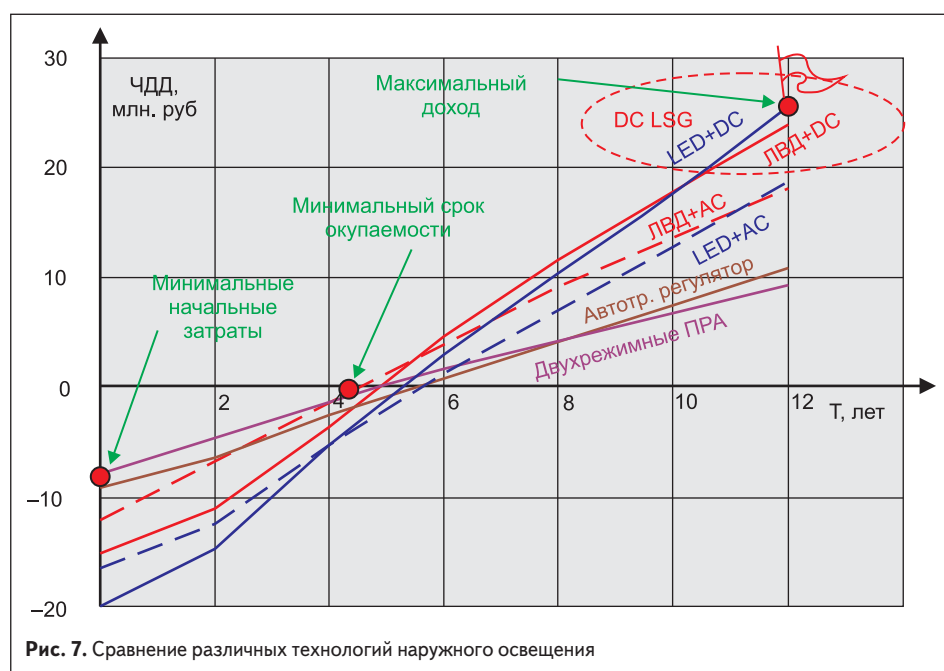


Рис. 7. Сравнение различных технологий наружного освещения

большая работа по стандартизации требований ко всем типам светильников. Замена подлежали все уличные НЛВД светильники мощностью 70, 100, 250 и 400 Вт. За четыре года было заменено две трети всех городских светильников и в целом изменен вечерний облик города, в котором снималось громадное число сцен голливудских фильмов. Из желто-оранжевого он превратился в белый. Было введено даже автоматизированное определение географического положения каждого светильника по GPS с точной привязкой к опоре и отображением на карте города. Можно констатировать, что это была интереснейшая попытка уйти от обычного метода проб и ошибок по внедрению нового оборудования в системах освещения с постановкой генеральным заказчиком понятной для всех участников конечной цели и выполнением жесткого графика работ.

В то же время следует отметить, что во главе угла как в этой программе, так и в известной программе DOE под названием CALiPER (Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting) наблюдалось лоббирование интересов производителей светодиодов и создание благоприятной конкурентной среды. Только во вторую очередь учитывались интересы населения и эксплуатирующих организаций, которые в целом совпадают с базовыми системными подходами по получению требуемого интегрального результата. В данном случае имеется в виду получение необходимого комфортного городского освещения минимально возможными суммарными затратами. По всей видимости, в условиях рыночной экономики весьма затруднительно найти силы и средства для постановки и решения нетривиальной задачи создания такой сложной системы управления.

Достаточно сказать, что система освещения Лос-Анджелеса не была полностью охвачена интеллектуальной системой управления и диагностики, что вынудило городское бюро обратиться к старой испытанной схеме оповещения эксплуатирующего персонала — по телефонным звонкам граждан. Для повышения оперативности был даже выделен удобный телефонный номер 311, напоминающий номер службы спасения 911. В результате малой оперативности и полноты диагностики в системе наблюдается ряд трудностей. Среди них — большая трудоемкость ведения базы данных светильников и отсутствие автоматизации в планировании ремонтно-восстановительных работ.

Кстати, для отечественных эксплуатирующих организаций внедрение такой сложной системы без автоматического подсчета важнейшего эксплуатационного показателя — «процента горения» — и без оперативного контроля обрывов линий освещения с точностью до опоры можно было бы считать серьезной ошибкой.

По мнению автора, использование в системе Лос-Анджелеса существующих стандартов DOE по управлению наружным освещением ANSI-C136-10 и ANSI-C136-41 не позволило разработчикам и проектировщикам системы сделать шаг вперед и создать действительно

передовую ИТ-систему. Связано это с тем, что упомянутые стандарты предусматривают весьма ограниченные возможности управления диммированием и не оговаривают вопросы диагностики светильников.

Как известно, серия стандартов ANSI-C136 предполагает два варианта управления светильниками.

В первом варианте используются сигналы индивидуальных фотодатчиков, размещаемых на светильниках. Уже было отмечено, что в реальных городских условиях весьма затруднительно получить достоверные команды включения и выключения уличного освещения с помощью фотодатчиков. Действительно, загрязнение и снег нарушают их работу, вызывая досрочное и неодновременное включение света. Посторонняя засветка фотодатчиков от фар автомобилей и рекламы может спровоцировать выключение света в ночное время. В условиях Санкт-Петербурга при приближении белых ночей определение момента включения освещения по фотодатчику возможно только с огромной погрешностью. В отечественных системах наружного освещения последний фотодатчик, используемый для автоматической коммутации городского освещения, в 1999 году автор неожиданно для себя обнаружил в Якутске. Устройство применялось на автономном пункте питания, не имеющем связи с диспетчерской. В настоящее время во многих городах России фотодатчики полностью заменены электромеханическими и электронными часами, чтобы повысить надежность автономного управления пунктами питания. В автоматизированной системе управления освещением Санкт-Петербурга применяется только несколько контрольных фотодатчиков, размещенных в разных районах города. Они используются диспетчером как элемент дополнительной информации, например при необходимости досрочного и одновременного включения освещения районов города при надвигающемся фронте облаков.

Второй вариант управления по ANSI-C136 предусматривает передачу команд диммирования по радиоканалу, однако управление собственно светильником осуществляется по одностороннему интерфейсу 1–10 В. В результате диагностика работы светильников осуществляется только по обобщенной информации об энергопотреблении всех светильников, подключенных к пункту питания, что в наше время уже не может быть признано достаточным.

Таким образом, в системе освещения Лос-Анджелеса не обеспечивается полный контроль уличного освещения из-за отсутствия двусторонней связи с каждым светильником.

Необходимо отметить, что упомянутая серия стандартов ANSI-C136 предусматривает наличие управления светильником от дополнительного внешнего съемного блока со встроенным фотодатчиком либо с радиоканалом. Подключение этого блока осуществляется через специализированный семиконтактный электрический соединитель. Степень защиты в этом соединении для

наших условий эксплуатации должна быть не ниже IP67. Такая конструкция уже сама по себе увеличивает стоимость решения и является дополнительным элементом надежности.

Следует констатировать, что подход к характеристикам надежности светильников должен носить сугубо экономический характер. Для этого необходимо провести оптимизацию суммарных расходов по достижению повышенной живучести светильника с учетом стоимости проведения замен и ремонтов в процессе эксплуатации. К примеру, при наработке на отказ электроники светильника в 200 тыс. часов (а это весьма высокая характеристика) и количестве светильников в городе 200 000 шт. мы получим интенсивность потока отказов, равную одному отказу в час, или около 200 отказов (или 0,1%) в месяц. Причем необходимо учитывать, что в отличие от традиционных систем освещения, в которых основным методом восстановления работоспособности являлась замена лампы, в светодиодных системах придется менять целиком светильник на опоре с последующим его ремонтом. Попытки решения данной проблемы путем создания конструкций светильников с легкоъемными драйверами и даже с легкоъемными светодиодными модулями вызывают сомнения ввиду сложности сохранения степени защиты и надежности стыковки с теплоотводом.

Оценка характеристик надежности также вошла в наш экономический расчет, результаты которого представлены на рис. 7. По предварительной оценке, при оптимизации показателей надежности по суммарным затратам за назначенный срок жизни, можно уменьшить количество негорящих светильников на улицах Санкт-Петербурга в 3–4 раза, что эквивалентно увеличению «процента горения» с 95 до 98–99%.

Выводы

*Художник творить «безознательно»,
а иногда даже наперекорь своему намерению:
Гоголь хотѣлъ въ «Мертвыхъ душахъ»
только пошутить, а довелъ и себя
и Пушкина до слезь.
П. К. Энгельмейер*

Ход нашего исследования привел к результату, существенно отличающемуся от ожидаемого. Вместо выявления победителя в гонке систем (технологий) наружного освещения мы получили концепцию новой технологической платформы, на которой в дальнейшем с новой силой и в существенно обновленном виде разгорится конкурентная борьба технологий наружного освещения.

В настоящее время мы находимся на пороге революционных изменений в области наружного освещения, которые принято связывать с тотальным переходом на светодиоды. В действительности же назрела системная революция, которая будет происходить под знаком перехода к интеллектуальному освещению, обеспечивающему максимальное энергоресурсосбережение.

По мнению автора, для формирования требований к интеллектуальной системе городского освещения и ее составным частям необходимо достижение определенного консенсуса разработчиков, производителей и эксплуатирующего персонала. Именно такой подход предоставит точные критерии для каждой составной части интеллектуальной системы освещения и позволит отказаться от общепринятого метода проб и ошибок в выборе вариантов построения энергосберегающих технологий. На первое место в этом вопросе следует поставить взаимную информационно-разъяснительную работу, направленную на формулировку и реализацию тех новых возможностей, которые способна дать интеллектуальная система освещения для городского населения и для эксплуатирующей организации. Кроме этого, для решения сверхсложной задачи создания такой системы, которая требует применения самых современных решений в вопросах конструирования многих типов светильников, разработки средств управления и связи, а также программного обеспечения всех уровней, чрезвычайно важно создать эффективный консорциум ведущих отечественных производителей, закрывающий все эти направления.

В настоящее время ОАО «НИИ точной механики» в содружестве с рядом предприятий проводит инициативную разработку пилотного проекта системы наружного (уличного) освещения «АВРОРА+» для Санкт-Петербурга. ●

Автор выражает искреннюю благодарность коллективу разработчиков ОАО «НИИ точной механики» и коллегам из диспетчерской службы ГУП «Ленсвет», вместе с которыми был пройден сложный путь внедрения, эксплуатации и модернизаций АСУ наружного освещения «АВРОРА» и с которыми он надеется пройти такой же путь по системе «АВРОРА+».

Литература

1. М. М. Панов. Оценка деятельности и система управления компанией на основе КРП. — М.: Инфра-М, 2012. (Просто, Кратко, Быстро).
2. Н. Бердяев. Смысл творчества (Опыт оправдания человека). М.: Изд-во Г. А. Лемана и С. И. Сахарова, 1916 г.
3. Ю. Б. Айзенберг, Е. Ю. Матвеева, Д. Д. Юшков. О состоянии освещения городов страны // Светотехника. ISSN 0039-7067. 2012. № 6.
4. П. М. Шевкоплясов. Основы управления качеством городских осветительных систем. (Из опыта Ленсвета.) Л. Энергоатомиздат. 1986.
5. А. В. Степанов, О. Г. Корягин. Наружное освещение на старте XXI века // Техника городского хозяйства. 2001. № 4.
6. Методика расчета тарифов на техническое обслуживание установок наружного освещения Санкт-Петербурга и его пригородов. Администрация Санкт-Петербурга. КЭРППиТ. Распоряжение от 17.07.2003 года № 31-р.
7. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Естественное и искусственное освещение. СНиП 23-05-95. Издание Министерства строительства Российской Федерации (Минстрой России). Москва. 1995.
8. Свод правил СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. Министерство регионального развития РФ. Москва. 2011.
9. О. Т. Зотин. Технологии автоматизации в энергоресурсосберегающих сетях освещения // Современные технологии автоматизации. 2012. № 4.
10. Справочная книга по светотехнике. Под ред. проф. Ю. Б. Айзенберга, 3-е изд., ил. М.: 2008.
11. О. Т. Зотин. В преддверии возрождения постоянного тока // Силовая электроника. 2013. № 4–6.
12. О. Т. Зотин, Н. О. Морозова. Анализ эффективности управления энергосбережением в наружном освещении // Современная светотехника. 2010. №2.
13. О. Т. Зотин, Н. О. Морозова. Энергосберегающее управление наружным освещением. Возможные принципы построения и сравнительная оценка вариантов // Светотехника. 2010. № 5.
14. В. Е. Манойлов. Основы электробезопасности. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л., «Энергия», 1976.
15. О. Т. Зотин. Управление освещением открытых пространств. Часть 2 // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 2.
16. П. К. Энгельмейер. Теория творчества. Изд. 3-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010.