

Управление и надёжность в сетях наружного освещения: на пути к 50% энергосбережению и 100% горению.

О.Т. Зотин, начальник отдела ОАО "НИИ ТМ", Санкт-Петербург.



Рассмотрены варианты существующих и перспективных технологий энергоресурсосбережения в наружном освещении. Рассмотрены актуальные вопросы построения сетей управления НО Light Smart Grid (LSG).

Приведена экономическая оценка вариантов технологий для типичной установки НО. Обоснованы перспективные варианты технологий для реализации пилотных проектов. Показана роль надёжности в экономической эффективности вариантов.

Рассмотрены актуальные вопросы разработки силовых светодиодных модулей уличного освещения и электронной пускорегулирующей аппаратуры для ламп высокого давления.

1. Введение

Внедрение энергосберегающих технологий в наружном освещении (НО) с каждым годом становится всё актуальнее. Известны несколько программ (пилотных проектов), реализованных в Европе, в Северной и Южной Америке, направленных как на повышение экономичности собственно светильников, так и на обеспечение энергосберегающих способов и алгоритмов управления сетей НО.

Очевидно, что идёт процесс накопления результатов опытной эксплуатации систем и оборудования в рамках этих пилотных проектов. По мнению автора, намечающаяся тенденция усложнения систем управления наружным освещением, в конце концов, приведёт к созданию сетей управления освещением LSG.

На основе анализа вариантов существующих и перспективных технологий энергоресурсосбережения в сетях управления НО с учётом надёжности их составных частей обоснованы способы реализации пилотных проектов для России.

2. Возможные резервы энергосбережения в НО

Прогресс в области источников света для наружного освещения привел к использованию в установках освещения наиболее энергоэффективных газоразрядных ламп высокого давления (ЛВД). В наружном освещении применяются натриевые лампы высокого давления (НЛВД), а также, в отдельных случаях, более дорогие металлогалогенные лампы (МГЛ), обладающие спектром, наиболее близким к спектру Солнца. Эти типы ламп практически полностью вытеснили ртутные лампы высокого давления (РЛВД). Оба типа ламп высокого давления оснащаются пускорегулирующей аппаратурой (ПРА), обеспечивающей их питание от сети переменного тока. Индукционные люминесцентные лампы (ИЛ) и серные лампы

высокого давления (СЛ)

находят в НО ограниченное применение.

В последние годы появились решения со сверхяркими голубыми светодиодами покрываемыми желтым люминофором – т.н. сверхяркими белыми светодиодами (СБС).

На рис.1 представлена оценка прогресса в светоотдаче применяемых в НО источников света. Очевидно, что даже стремительный прогресс СБС не должен привести в ближайшие годы к существенному прорыву в деле энергосбережения в НО.

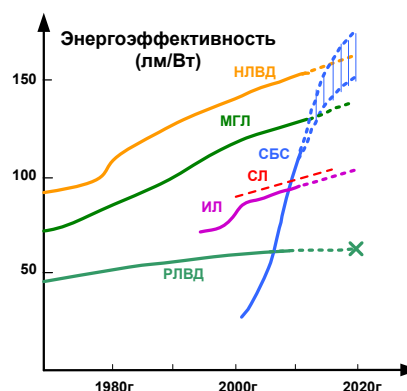


Рис 1. Энергоэффективность источников света, применяемых в НО

Для выяснения возможных резервов энергоресурсосбережения рассмотрим структуру существующих установок НО[1]. Они, как правило, включают в себя понижающий трансформатор 10кВ/0,4кВ, 3ф, 50Гц; пункт включения (ПВ), осуществляющий коммутацию, управление, контроль и энергоучет, трёхфазные линии НО и, собственно светильники. Лампы высокого давления НЛВД и МГЛ подключаются в светильниках к одной из фаз через электромагнитную пускорегулирующую аппаратуру (ЭмПРА), которая содержит балластный дроссель, согласующий низкое динамическое сопротивление лампы с напряжением сети, импульсное зажигающее устройство, обеспечивающее поджиг разряда в лампе, и конденсатор, корректирующий коэффициент мощности до приемлемой величины.

Традиционный способ экономии энергопотребления при управлении такими городскими установками заключается в отключении 1/3 или 2/3 светильников в ночное время (на 4-5 часов), когда снижается активность населения и интенсивность дорожного движения. Такой простейший способ экономии обеспечивает суммарную экономию электроэнергии

до 15-30%, но создает чрезвычайно большую неравномерность освещённости и, поэтому, не рекомендуется для использования международной

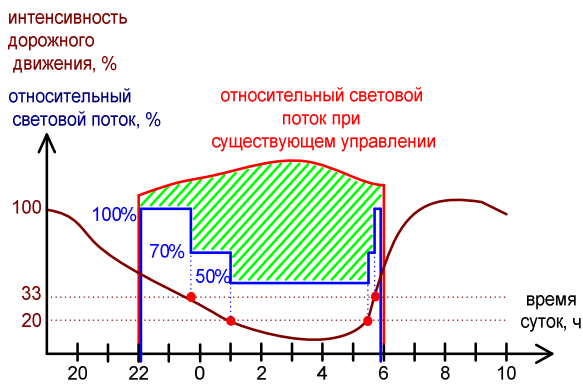


Рис.2. Энергосбережение (заштрихованная площадь) при диммировании и стабилизации питания

комиссией по освещению МКО ввиду негативного влияния на безопасность дорожного движения [2]. В Москве и Санкт-Петербурге такое пофазное отключение не используется.

Рекомендованный МКО метод энергосбережения предполагает уменьшение уровня освещения от каждого светильника (регулирование яркости - диммирование). При этом, согласно СНиП 23-05-95 [3], разрешается снижать уровень освещения в ночное время на 50%, а в вечернее и утреннее время на 30% и 50% при уменьшении интенсивности дорожного движения в 3 и 5 раз соответственно. При реальном времени ночного режима при диммировании и стабилизации питания экономия электроэнергии может достигать до 30-35%, что иллюстрируется на рис.2

Под экономией за счет напряжения питания понимается стабилизация напряжения на каждой лампе групповым или индивидуальным способом, компенсирующая нестабильность (возрастание) напряжения в сети, которая может достигать (особенно в ночное время) до 15% и более.

Дополнительные возможности энергосбережения заключаются в следующем:

- уменьшение потерь электроэнергии в ПРА ($\approx 5\%$),
- использование более экономичных режимов работы ПРА и ламп, в том числе без т.н. «перезажигания» ($\approx 5-10\%$),
- использование при диммировании проектных запасов по освещенности с учетом старения ламп и учета их загрязнения и периодической чистки ($\approx 5-15\%$),
- использование полного отключения отдельных осветительных установок (например, рекламы),
- индивидуальная подстройка необходимого светового потока светильника под требуемый номинал при запуске осветительной установки.

Кратность требуемого регулирования мощности при использовании всех возможных резервов энергосбережения может достигать до 3-4 раз от номинальной. Такое диммирование пока не обеспечивается большинством производителей ЛВД. При этом в расчетах необходимо учитывать, что эффективность ЛВД при диммировании существенно снижается, а у некоторых типов ЛВД глубина диммирования без существенного ухудшения спектральных характеристик (индекса цветопередачи) не превышает 30%.

В отличие от ЛВД у СБС эффективность при диммировании существенно увеличивается (см. рис.3), что даёт СБС довольно существенное преимущество при таком виде управления, которое может составить дополнительно до 5-10% экономии

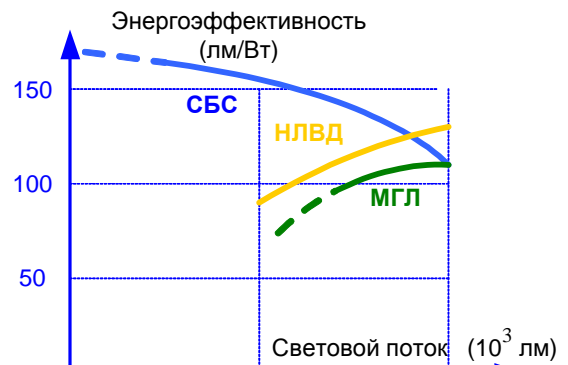


Рис.3 Изменение энергоэффективности СБС, НЛВД, МГЛ при диммировании.

электроэнергии

Суммируя всё вышесказанное, можно с уверенностью утверждать, что суммарный результат экономии электроэнергии в **50% реально** достижим.

Общая экономия электроэнергии при внедрении подобных энергосберегающих технологий в наружном освещении в десяти крупнейших городах России может достигнуть $3 \cdot 10^{15}$ Дж в год, что соответствует уменьшению выбросов CO_2 не менее, чем на 100 тысяч тонн в год.

3. Возможные резервы ресурсосбережения и повышения надёжности в НО

Есть несколько факторов, позволяющих говорить о существенных резервах ресурсосбережения в установках НО.

Один из важнейших факторов связан с обеспечением высокого уровня надёжности собственно источников света. В одном из последних исследований ВНИСИ и Моссвета [4], полученных на реальных установках НО, показано, что вероятность безотказной работы НЛВД с наиболее распространённой в НО мощностью 150 Вт и наработке в 6000ч, при применении электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭлПРА) увеличивается до 0,9 в сравнении с 0,7 для электромагнитных ПРА. Основными причинами этого, вероятнее всего, являются стабилизация мощности ламп во всех режимах эксплуатации, ограниченные пусковые токи и отсутствие «перезажигания» на

каждом полупериоде сетевого напряжения. Как следует из работы [5] эти же причины вызывают меньшую деградацию светотехнических характеристик ЛВД при применении ЭлПРА.

Необходимо принимать во внимание также тот факт, что стоимость работ по замене ламп НО зачастую превосходит стоимость лампы. Так на современных скоростных магистралях групповой заменой ламп занимается бригада не менее, чем из трёх человек на двух автомобилях: автовышке и устанавливаемом сзади грузовом автомобиле для обеспечения безопасности работ.

При проведении сравнительных расчетов различных вариантов технологий энергоресурсосбережения следует также учитывать стоимость основного (светильники, силовые и управляющие кабели и др.) и вспомогательного оборудования, а также затраты на его монтаж, ремонт и эксплуатацию. Например, применение ЭлПРА дает, с одной стороны, экономию электроэнергии, экономию в сечении силовых кабелей, увеличение срока службы ламп и уменьшение затрат на их периодическую замену, с другой стороны, может возрасти стоимость светильников и уменьшится их надёжность. По нашей оценке приемлемые эксплуатационные затраты достигаются при вероятности безотказной работы ЭлПРА не менее 0,95 за срок службы лампы, который может составлять для обычных ЛВД до 24 тыс.ч, а для двухгорелочных НЛВД – до 48тыс.ч. Аналогичные требования необходимо предъявлять и к драйверам ламп на светодиодах.

Не следует забывать и о таком важнейшем факторе, как влиянии ночного освещения на здоровье людей. Последние исследования, в частности [6, 7], указывают на реальность опасности роста количества раковых заболеваний при нарушении циркадианных ритмов, вызываемых торможением синтеза гормона мелатонина под воздействием ночного освещения. Уменьшение яркости позволяет уменьшить эту потенциальную опасность. В работах [6, 7] рекомендуется для этой цели подавлять синюю составляющую спектра при ночном освещении, которая имеет наибольшее влияние на описанный процесс.

4. Возможные варианты технологий энергоресурсосбережения в НО

Энергоресурсосберегающие решения (или технологии) в сфере НО следует подразделить на несколько групп (направлений).

К первой из них следует причислить описанные выше традиционные схемы пофазного отключения (вариант 1), а также их более совершенный вариант с удвоенным числом светильников на каждой опоре или со светильниками с двумя лампами (вар.2). Такая модернизация традиционной схемы обеспечивает равномерность освещенности в ночном режиме и подкупает своей простотой. Однако, она весьма затратна как при монтаже, так и при эксплуатации.

К этой же группе условно можно отнести известное решение с двухрежимными ЭлПРА (вар.3),

обеспечивающее уменьшение освещенности в ночном режиме до 50% с экономией энергопотребления до 30% за счет подключения в каждом светильнике дополнительного балластного дросселя в ночном режиме. Такое решение было первым энергосберегающим решением, обеспечивающим индивидуальное диммирование ламп. Однако, для его реализации требуется, как минимум, дополнительная линия управления и, в общем случае, дополнительные компенсирующие конденсаторы в каждом светильнике. Необходимо также учитывать, что при таком решении происходит мгновенное переключение в режим диммирования, что не рекомендуется производителями ЛВД, поскольку возникает опасность внезапного погасания лампы, существенно возрастающая при увеличении времени её наработки.

Ко второй группе решений необходимо отнести технологии, обеспечивающие «групповое» управление светильниками путём изменения общего выходного напряжения на линиях освещения (ЛО), отходящих от ПВ.

На рис.4 представлен пример графика зависимости напряжения в ЛО от времени при групповом управлении по материалам фирмы Lumtec [8].

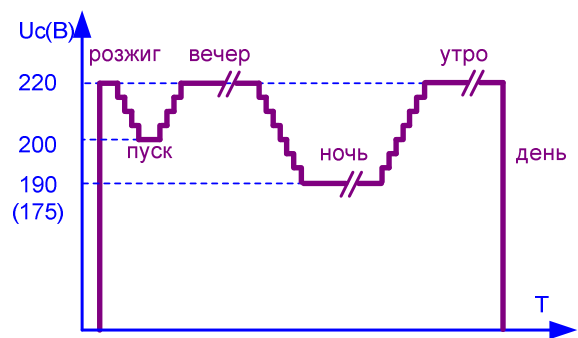


Рис 4. График зависимости напряжения в ЛО от времени суток при групповом управлении

Энергосбережение достигается за счет стабилизации напряжения в ЛО, уменьшения пусковых токов, регулирования напряжения сети (U_c) в ночном режиме до 190 В для НЛВД и 175 В для РЛВД. В решениях этой группы экономия энергопотребления не превышает 30%.

Из этой группы решений наиболее широко применяется вариант с управляемым переключением обмоток автотрансформатора с помощью симисторов или контакторов (вар.4). При малом шаге диммирования (напряжение переключения обмоток ~5В) исключается возможность погасания ЛВД.

Однако, эффект возрастания напряжения питания ЛВД к концу срока службы и разброс характеристик ламп не даёт возможности использовать полностью диапазон диммирования при таком способе управления.

Кроме этого, управляемые трансформаторы приводят к существенному увеличению габаритов ПВ.

Меньшее распространение нашли схемы с симисторными фазорегуляторами (вар.5), которые, несмотря на простоту реализации регулирования, требуют дополнительного управляемого компенсатора коэффициента мощности.

Существует возможность использования более сложных схем с конверторами-преобразователями, довольно широко применяемыми в других областях (вар.6), однако конкретные реализации такого варианта в НО нам неизвестны. Это, скорее всего, связано с высокой стоимостью и относительно низкой надёжностью подобных решений.

К третьей группе решений автор относит варианты с применением управляемых ЭлПРА в светильниках, что принципиально обеспечивает весьма высокий процент экономии электроэнергии до $\approx 45\%$.

Такого рода ЭлПРА (или электронные балласты) дают возможность использования почти всех резервов по повышению энергоэффективности в НО, однако, их функциональная сложность приводит к проблемам в получении высокой надежности и низкой стоимости. Известные схемы т.н. «высокочастотных» ЭлПРА [6] обеспечивают надёжную работу только с НЛВД ввиду возможности размещения частоты питания лампы ($\sim 1-100\text{кГц}$) вне зоны акустического резонанса в газовом разряде. Для питания МГЛ ведущие производители не рекомендуют использовать частоты, превышающие нескольких сотен Гц.

Большое количество публикаций в последнее время были посвящены рассмотрению схемы универсальной «низкочастотной» ЭлПРА (вар.7) для управления как НЛВД, так и МГЛ [9]. Один из популярных вариантов рассмотрен в широко известной статье [10]. Сложность подобных ЭлПРА вызвана необходимостью обеспечения питания ЛВД низкочастотным регулируемым прямоугольным напряжением (Low Frequency Square Wave - LFSW). Для этого необходимо четырёхкратное преобразование полной мощности в выпрямителе, корректоре коэффициента мощности, регуляторе тока и выходной мостовой схеме.

ЭлПРА такого типа насчитывают до 13 силовых полупроводниковых элементов, работающих при напряжениях до 450В, при этом требуется обеспечить работу схемы в диапазоне температур минус 40...+80°C. Вероятность безотказной работы такой схемы не превышает, по нашей оценке, 0,9 за 24000ч, что совершенно недостаточно. Наиболее существенный вклад в такой низкий показатель вносит фильтрующий электролитический высокочастотный и высоковольтный конденсатор на выходе корректора коэффициента мощности, который, как показано в работе [5], имеет в жестких условиях эксплуатации систем НО срок службы, сравнимый со сроком службы лучших ЛВД.

Существенно увеличить надёжность и уменьшить стоимость ЭлПРА возможно путём обеспечения выпрямления напряжения и компенсации коэффициента мощности непосредственно в ПВ или трансформаторной подстанции (ТП).

Предлагаемый вариант (вар.8) включает в себя силовой выпрямитель, устанавливаемый непосредственно после силового трансформатора в ТП (или ПВ), линию постоянного напряжения $U_c=220\text{В}$ и светильники с ЭлПРА постоянного тока (ЭлПРАпт) описанные в работе [11]. Одна из возможных реализаций ЭлПРАпт показана на рис 5. Такая схема может обеспечить резонансное зажигание ЛВД и трёхуровневую широтно-импульсную модуляцию с режимом питания ЛВД, близким к LFSW. Примеры реализации элементов ЭлПРАпт приведены в [5,12]. Рассматриваемая схема содержит всего четыре силовых MOSFET транзистора и имеет, в связи с этим, более высокую надёжность. Вероятность безотказной работы ЭлПРАпт по предварительной оценке составляет 0,96 за 48000час.

Коэффициент полезного действия ЭлПРАпт существенно выше, чем у традиционных устройств.

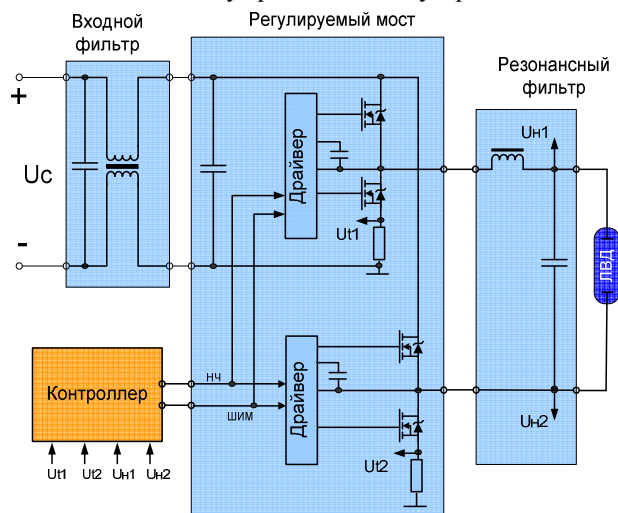


Рис.5 Функциональная схема ЭлПРАпт

Это обуславливается существенно меньшим сопротивлением и большим быстродействием силовых MOSFET транзисторов по сравнению с аналогичными элементами схем традиционных «высокочастотных» и «низкочастотных» ЭлПРА, которые должны быть рассчитаны на напряжение до 500-600В. Повышенное быстродействие транзисторов, применяемых в ЭлПРАпт, обеспечивает также работу этой схемы на более высоких частотах, что позволяет уменьшить габариты используемых дросселей и конденсаторов.

При таком варианте построения ЛО к силовому выпрямителю должны предъявляться повышенные требования по надёжности. Оценка требуемой вероятности безотказной работы выпрямителя превышает 0,99 за 48000ч, что вызывает необходимость применения отказоустойчивых схем с развитой диагностикой и структурным резервированием.

К четвёртой группе технологий следует отнести решения с СБС (вар.9), которые, не обладая преимуществом по номинальной светоотдаче и имея в сравнении с ЛВД большую стоимость, существенно превосходят их по сроку службы и по возможностям

управления, например по диммированию. К этой же группе можно отнести решения с комбинированными светильниками [13], которые сочетают в себе экономичные ЛВД и СБС с возможностью глубокого диммирования (вар.10), а также с возможностью изменения спектра излучения согласно работе [9]. Однако комбинированные светильники имеют более сложную электронику и конструкцию.

Прогресс в четвёртой группе технологий возможен при существенном снижении стоимости светильников с СБС и повышении их надежности и энергоэффективности. Существующие « типовые » решения уличных светодиодных светильников пока неудовлетворительно решают две основные задачи – эффективного охлаждения СБС и минимизации оптических потерь при получении приемлемого светораспределения. Попытка стандартизовать сменяемые двухкомпонентные светодиодные модули для уличных светильников (street LED light engine) сконструированных в этой парадигме, предпринятая 3-й рабочей группой (WR3) консорциума Zhaga [14] может не привести к успеху. Необходимы дальнейшие исследование решений поставленных задач, в том числе и с проработкой вопроса возможной работы светильников с СБС в сети постоянного напряжения аналогично вар.8.

По вариантам 3, 7, 8, 9 и 10, в которых используются регулируемые (диммируемые) светильники, возможны следующие подварианты, связанные с различными способами их управления:

- а) управление светильниками по дополнительной командной линии с общепринятыми интерфейсами, например DALI, DSI, 1-10V, DMX512;
- б) управление светильниками путем коммутации напряжения (тока) в линии НО;
- в) управление светильниками с помощью радиоканала (например, по технологии ZigBee) или управление непосредственно по силовой сети (т.н. PLC модем);
- г) автономное управление светильниками от встроенных таймеров и/или фотодатчиков.

Вышеприведенные варианты рассматриваются в качестве «нижнего» уровня управления LSG, а именно уровня группового и индивидуального управления коммутаторами, регуляторами и светильниками.

5. Дополнительные эксплуатационные возможности LSG

Одним из важнейших эксплуатационных показателей систем НО является т.н. «процент горения». Удовлетворительным показателем в установках НО считается значение на уровне 95%. При наличии возможности индивидуального управления и диагностики работы каждого светильника (т.е. при реализации LSG) открывается возможность увеличения этого показателя.

При обеспечении передачи информации от каждого светильника до ПВ и в диспетчерскую эксплуати-

рующей организации актуальным является обеспечение двух видов диагностики:

а) диагностика отказа лампы – позволяет существенно повысить оперативность реагирования ремонтных служб, уменьшить затраты на т.н. «объезды» с целью выявления отказавших ламп, увеличить результативность ремонтов.

б) предотказная диагностика ламп - дающая возможность заранее (за несколько недель) определить потенциально неисправные лампы и произвести их замену.

Последняя возможность является важным шагом на пути к обеспечению 100% горения светильников на каждой ЛО.

При реализации LSG достижимо и улучшение характеристик живучести систем НО при возникновении нештатных (аварийных) ситуаций. Например, не так уж редко происходит пропадание напряжения на одной из входных фаз. Это приводит к погасанию 1/3 светильников в типовой схеме ЛО. При реализации же LSG по вар.8 применение многофазного (например 12-ти пульсного) выпрямителя обеспечивает практически нормальную работоспособность ЛО за счет использования напряжения оставшихся двух фаз.

6. Оценка экономической эффективности

До настоящего времени при выборе «наилучшей» технологии для НО преобладал т.н. «критериальный» подход [15]. В своей оценке эффективности энергоресурсосберегающих технологий НО автор во главу угла поставил сравнительную экономическую оценку вариантов. При этом принимались во внимание затраты по каждому из вариантов в течение расчетного периода в 6 лет. Сравнение вариантов произведено по чистому дисконтированному доходу (ЧДД) от дополнительных (относительно типового варианта №1) вложений. Ставка дисконтирования принята равной 20%.

С целью оптимизации объёма вычислений при оценке эффективности учитывалась разница в показателях между каждым конкретным вариантом и типовым вариантом (вар.1). При этом имелось в виду, что в типовом варианте «ночной» режим с пофазным отключением не используется.

Кроме упомянутых выше показателей энерго- и ресурсосбережения в оценке учтены прогнозы по росту тарифов на электроэнергию по РФ, и цена так называемой «выделяемой» мощности.

Расчет проводился по фрагменту системы НО участка магистрали, имеющему 328 светильников, 8,2 км линий освещения и обслуживаемому одной ТП и 2-мя ПВ.

Предварительные результаты оценки ограниченного круга вариантов с учетом меньшего числа возможностей энергоресурсосбережения были представлены ранее в [16]. Для большей наглядности и информативности результаты оценки представлены в графическом виде на рис.6.

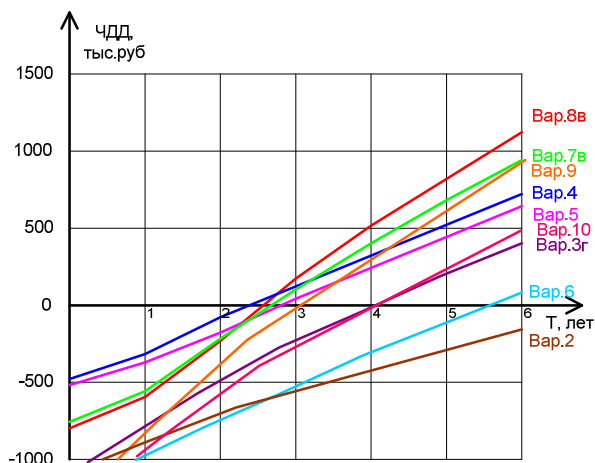


Рис.6 ЧДД по вариантам технологий

По каждому из вариантов приводится только один подвариант с наилучшим ЧДД.

Лучшие характеристики варианта 8в (ЭлПРАпт+PLC модем) объясняются реализацией максимальной экономии электроэнергии при высокой надежности ЭлПРАпт.

Очевидно, что варианты 4 (с автотрансформатором) и 5 (фазорегулятор) из-за меньшей экономии электроэнергии существенно проигрывают вариантам 7в (ЭлПРА+PLC модем), 8в и 9.

Сравнительно худшие показатели варианта 7в в сравнении с вариантом 8в могут быть объяснены большей ценой ЭлПРА и меньшей его надежностью. Системы наружного освещения со светодиодными светильниками (варианты 9 и 10) имеют большие начальные затраты (высокая цена светильников) при большом потенциале дальнейшего развития.

Очевидно, что при существующих показателях решения с СБС в области НО находят наибольшее применение в основном в архитектурно - художественной подсветке, где они имеют преимущества в иных светотехнических характеристиках.

В целом, как уже было отмечено, при очевидном лидерстве технологии по варианту 8в с ЭлПРАпт приемлемые результаты дают и четыре её ближайших преследователя (варианты 7в, 4, 5, 9). Неудовлетворительные показатели имеют варианты 3г (двухрежимный ЭмПРА+ таймер), 6 (конвертер), 2 (двойное число светильников) и 10. Очевидно, что оценку варианта 9 (СБС) потребуется корректировать при дальнейшем снижении стоимости светильников и каждом технологическом нововведении в области СБС.

Расчеты вариантов проводились для нового строительства или капитальной реконструкции линий НО. Внедрение технологий энергосбережения на действующих линиях НО без их реконструкции, потребует ряда уточнений в расчетах.

Необходимо отметить, что потенциальная сфера применения такого рода энергосберегающих технологий гораздо шире НО, они распространятся везде,

где в настоящее время используются ЛВД. Для автора очевидно, что развитие технологий энергосбережения в сетях НО выявило устойчивую тенденцию по широкому внедрению управляемых электронных балластов для ЛВД и драйверов для СБС в рамках автоматизированных систем управления освещением, что приведет в ближайшем будущем к созданию интеллектуальных сетей освещения (LSG).

Авторский проект «Энергоэффективная и ресурсосберегающая система городского освещения «АВРОРА+», базирующийся на применении технологий 7в, 8в и 9, на II открытом межрегиональном конкурсе по энергосбережению, проведенном в мае 2010г в г. Новосибирске Ассоциацией Сибирских и Дальневосточных городов и Сибирским отделением Российской Академии Наук завоевал диплом I степени в номинации «Энергосберегающие осветительные устройства».

Совсем недавно, в 2007 году главный инженер компании Consolidated Edison символически закончил 125-летнюю «войну» переменного и постоянного токов перерезав в Нью-Йорке последний питающий кабель постоянного напряжения [17]. Скорее всего, этот акт лишь завершил первый этап этой «войны» и нам предстоит наблюдать и участвовать в её продолжении.

Есть веские основания считать, что массовое внедрение электроники в светильники НО и методов энергосберегающего управления в LSG (при известной обособленности сетей НО) приведёт к предсказанному в 1919г апологетом трёхфазного напряжения М.О. Доливо - Добровольским [18] переходу на линии постоянного тока, изобретёнными Томасом А.Эдисоном более 130 лет назад [19].

Выводы

1. Изложенная концепция построения энергоресурсосберегающей системы наружного освещения обеспечивает экономическую целесообразность революционного изменения сетей наружного освещения - создания Light Smart Grid.

2. На базе сравнительной технико-экономической оценки различных технологий энергоресурсосбережения показана перспективность Light Smart Grid с линиями постоянного тока, обеспечивающая быструю окупаемость инвестиций, экономию электроэнергии до 50% и достижение 100% горения.

Литература:

1. Справочная книга по светотехнике. Под ред. проф. Айзенберга Ю.Б., 3-е изд. М.: 2008г, 952с.
2. CIE, «Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic». CIE Publication 115-1995.

3. СНиП 23-05-95. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Естественное и искусственное освещение.

4. Прикупец Л.Б., Меркулова А.П., Георгобини С.А., Клыков М.Е., Лобанов М.В., Исследование изменения световых и электрических параметров НЛВД в процессе эксплуатации в уличных ОУ. Доклад на Российской национальной светотехнической интернет-конференции, апрель 2009г.

<http://nsk2009.svetotech.com/?p=1225>

5. Евстифеев А., Особенности построения балластов для ламп высокого давления (HID lamp ballasts). Силовая электроника, №3'2008.

6. Stevens RG, Light-at-night, circadian disruption and breast cancer assessment of existing evidence. Department of Community Medicine, University of Connecticut Health Center, USA, 2009.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19380369>

7. International Dark-Sky Association, Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting, May 4, 2010.

http://docs.darksky.org/Reports/IDA_Blue-Rich_Light_White_Paper051710.pdf

8. Voltage Stabilizer & Step-Down Light Dimmer for Streetlighting.

<http://www.apecin-lumtec.com/reastat.pdf>

9. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. vol.22. NO.3. MAY 2007. SPECIAL SECTION ON LIGHTING APPLICATION

10. Ribarich T., Shedding Light on HID Ballast Control, Power Electronics Technology, Oct 1, 2006.

11. Патент РФ на полезную модель "Ресурсо- и энергосберегающая система освещения постоянного тока" № 80087.

12. Díaz F. J., Azcondo F. J., Brañas R.C., Zane R., Digital Control of a Low-Frequency Square-Wave Electronic Ballast With Resonant Ignition, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, NO. 9, September 2008.

13. Поляков В., Рожков Д., Интеллектуальный электронный балласт комбинированного светотехнического прибора. Силовая электроника, № 2' 2010.

<http://www.symmetron.ru/articles/72.pdf>

14. Zhaga Consortium for the standartization of LED light engines. <http://www.zhagastandard.org/>

15. Желтен Р., Выбор наилучшей технологии для наружного освещения. Современная светотехника, №3'2011.

16. Зотин О.Т., Морозова Н.О., Энергоресурсосберегающее управление в наружном освещении. Возможные принципы построения, сравнение вариантов. Светотехника, №5'2010.

17. A/C but no D/C: last Con Edison direct current customer is history.

<http://www.coned.com/newsroom/news/pr20071115.asp>

18. Доливо-Добровольский М.О., Избранные труды (о трехфазном токе). М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1948.

19. Edison T.A.. System of electric lightning. Patent No. 239,152, March 22, 1881.