

# Факты о регулировании яркости

## Регулировка яркости: будущее и настоящее

**Свыше 95% существующей бытовой и промышленной инфраструктуры регулирования яркости составляют одноканальные настенные регуляторы. Грег Шиэн (Gregg Sheehan), инженер по интеллектуальной собственности и НИОКР компании Light-Based Technologies, обосновывает важность поставки на рынок высококачественных решений и описывает способы преодоления трудностей, с которыми предстоит столкнуться в будущем.**

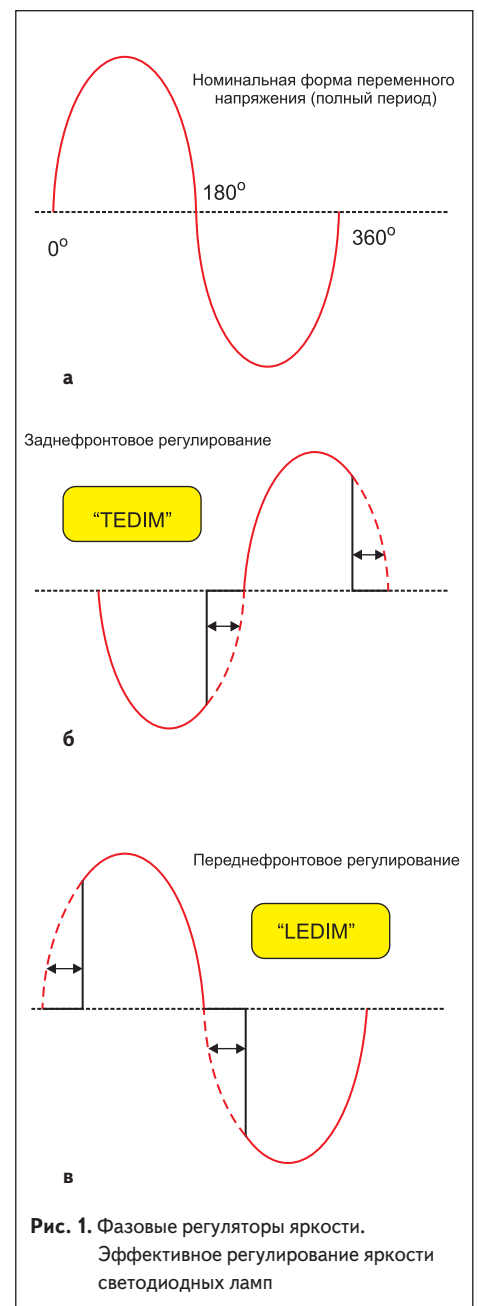
Настоящая статья посвящена прямому фазовому регулированию яркости в светодиодных осветительных системах. В нашу задачу не входит рассмотрение широкого ассортимента сетевых систем — в частности, DMX, DALI, управляющих сетей на диапазонах напряжений 0–10 или 1–10 В постоянного тока и театральных систем. Главным образом это обусловлено наличием большого количества литературы по использованию светодиодной аппаратуры в сетевом регулировании, а вот повсеместно распространенным одноканальным настенным регуляторам, на долю которых приходится свыше 95% существующей бытовой и промышленной инфраструктуры регулирования яркости, внимания уделяется недостаточно. Те, кому знакома данная тематика, осведомлены о необходимости корректировать коэффициент мощности, обеспечивать высокий КПД и стабильную работу, но трудности, сопряженные с достижением этих целей, не слишком хорошо изучены.

Одноканальные фазовые регуляторы яркости весьма популярны. По данным исследований, проведенных почти девять лет назад, только в США насчитывалось 4 млрд ламп накаливания и свыше 150 млн традиционных регуляторов яркости. По прогнозам, их количество в бытовых и промышленных зданиях еще долго будет продолжать увеличиваться. Этот рост обусловлен двумя причинами: во-первых, желанием улучшить эстетику помещений, а во-вторых, возможностью сэкономить энергию за счет снижения яркости. Правительства различных стран мира, основываясь на экологических соображениях, движутся к законодательному запрету традиционных ламп накаливания и флуоресцентных ламп, а светодиодные лампы, которые придут им на смену,

будут устанавливаться в те же самые патроны. Последнее обстоятельство необходимо подчеркнуть, так как с наибольшей вероятностью в конкретной осветительной системе будет заменяться тот светильник, который важнее всего для потребителя, а многие из таких светильников подключены через одноканальный регулятор яркости того или иного рода. Традиционный настенный регулятор, нагрузкой которого служит лампа накаливания, работает плавно и имеет привлекательный внешний вид. Он эстетичен и недорог в изготовлении. Такова планка, которую должны взять, а впоследствии и перешагнуть разработчики регуляторов яркости светодиодных светильников, чтобы их в полной мере приняли конечные потребители.

К сожалению, зачастую светодиодные светильники с регулированием яркости не отличаются столь высокими потребительскими качествами, и даже существенная экономия электроэнергии не делает их привлекательными для пользователей. Критерии стандарта Energy Star (США) предписывают поставщикам светодиодных ламп предоставлять списки совместимых регуляторов яркости, что служит достаточным доказательством далеко не идеальной совместимости таких ламп с традиционными инструментами управления.

В настоящее время используется два основных типа фазовых регуляторов яркости (принцип действия которых основан на вырезании определенных участков каждого полупериода переменного тока): переднефронтовые (LEDIM) и заднефронтовые (TEDIM) (рис. 1а–в). LEDIM популярны главным образом в Северной Америке, TEDIM — в странах ЕС и остальном мире; предполагается, что они лучше работают с низковольтными галогенными лампами, оснащенными электрон-



ными трансформаторами. В переднефронтовых регуляторах в качестве активных элементов обычно используются симметричные тиристоры (тринистор или тринистор/динистор), а устройство заднефронтовых регуляторов обычно сложнее, и активными элементами в них служат полевые МОП-транзисторы или БТИЗ. Можно сказать, что у LEDIM активным является выключенное состояние, а у TEDIM — включенное (относительно начала полупериода). Амплитуда выбросов и результирующий уровень высокочастотных шумов у заднефронтового регулятора несколько меньше (радиочастотные шумы и ЭМП в активном состоянии), так как он выключается, а не включается.

В общем случае для осветительной аппаратуры, включая светодиодные светильники и лампы, определены четкие стандарты на электрические характеристики, расчетный срок службы, температуру и светораспределение, которые вырабатываются и продвигаются сторонними сертифицирующими организациями. В число таких стандартов входят IES LM-79 и LM-80 (современное название, используемое Министерством энергетики США, — Energy Star). Однако аналогичные стандарты на фактические характеристики регулирования в рабочем диапазоне отсутствуют.

За практический образец в отрасли по-прежнему принимается поведение типичного регулятора с нагрузкой в виде лампы накаливания. Его характеристика представляется наиболее «правильной» для психовизуального восприятия среднестатистического пользователя в части относительной линейности и плавности работы. Такому плавному регулированию без мерцания способствует тепловая инерция нити накаливания и инерционность человеческого зрения. В действительности соотношение между выходной мощностью излучения лампы и зрительной реакцией человека при уменьшении яркости лампы накаливания с номинальной до нулевой представляет собой логарифмическую кривую. Но многие светодиодные светильники при уменьшении яркости могут полностью гаснуть уже на уровне 10–20% по шкале регулирования ввиду практических ограничений, налагаемых требованиями к минимальному напряжению источника питания. Более того, при низких уровнях мощности диапазон регулирования может содержать переходный участок, в котором наблюдается мерцание или видимое ступенчатое изменение яркости, обусловленное увеличением шага регулирования, как это происходит в стандартной системе с ШИМ. В действительности шаг ШИМ-регулирования везде одинаков, но нашему зрительному восприятию он представляется растущим (сравнение между воспринимаемым уровнем освещенности и абсолютной мощностью или абсолютным уровнем освещенности, рис. 12). В сравнении с идеалом такое поведение регулятора отвлекает и представляется неприемлемым.

Возьмем для примера рестораны. Это типичные пользователи регуляторов яркости: нормой в ресторанах является приглушенный

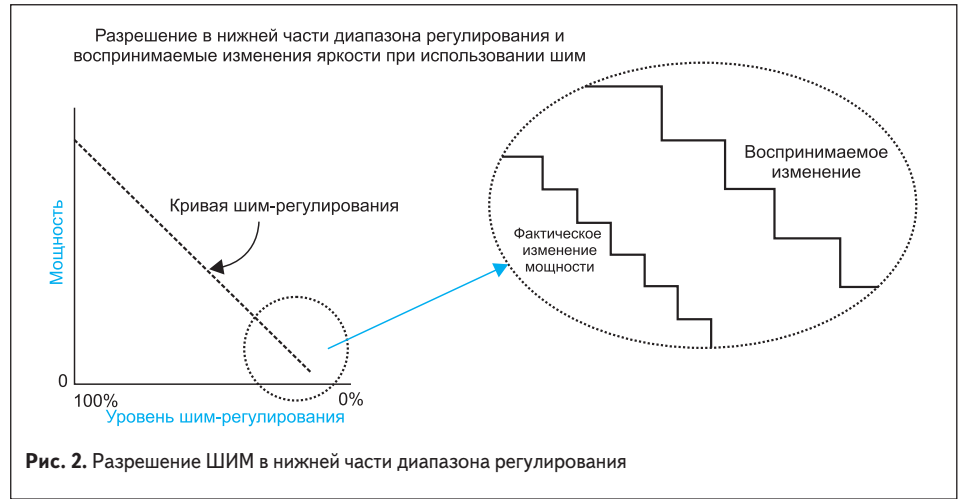


Рис. 2. Разрешение ШИМ в нижней части диапазона регулирования

свет с яркостью около 20% от максимальной, создающий традиционную «интимную» атмосферу. Рестораны используют практически театральный подход, устраивая зоны высокого яркостного контраста за счет тусклого фона между столиками и ярких островков света, которые создаются стоящими на столиках лампами или свечами. После закрытия и во время рабочего дня им также может потребоваться максимально яркое освещение для уборки и подготовки к новому дню. Еще один пример — кинотеатры. На них распространяются нормы безопасности, предписывающие четкие минимумы и максимумы освещенности, а также строительные нормы и правила. Именно в этой «нормальной» зоне малой яркости начинают проявляться недостатки ШИМ-регулирования, когда кончается запас по разрядам и начинаются крупные ступенчатые переходы, приводящие к мерцанию и резким изменениям яркости свечения (рис. 2).

Наиболее элегантным решением является интеллектуальное линейное регулирование яркости. Этот метод отличается совместимостью со всеми типами и марками регуляторов, а также значительно упрощает соблюдение норм стандарта Energy Star за счет возможности плавного управления яркостью во всем диапазоне. В настоящее время стандарт Energy Star не содержит

никаких конкретных указаний, кроме требования привести список марок и моделей совместимого оборудования. Преимущество одного такого собственнического подхода, предлагаемого компанией Light-Based Technologies, состоит в возможности программного масштабирования отклика лампы, которое обеспечивает более точное и повторяемое регулирование на конкретном участке диапазона. Смена режимов при использовании обыкновенного регулятора яркости от стороннего производителя достигается за счет регистрации изменения параметров регулятора при коротких, повторяющихся или конкретных перемещениях его органа управления. Например, быстрое движение вверх и вниз за время менее одной секунды переводит устройство в другой фиксированный режим работы — режим В (40% от максимальной яркости в максимальном положении ручки регулятора или при полном обороте ручки по часовой стрелке и против нее). На рис. 3 показано, как включение этой фирменной функции увеличивает разрешающую способность на нижнем участке таким образом, что нижние 20–50% диапазона регулирования распределяются по всему диапазону положений электромеханического органа управления (роль которого может исполнять поворотный или движковый потенциометр, емкостной датчик или сенсорный интерфейс). Работа

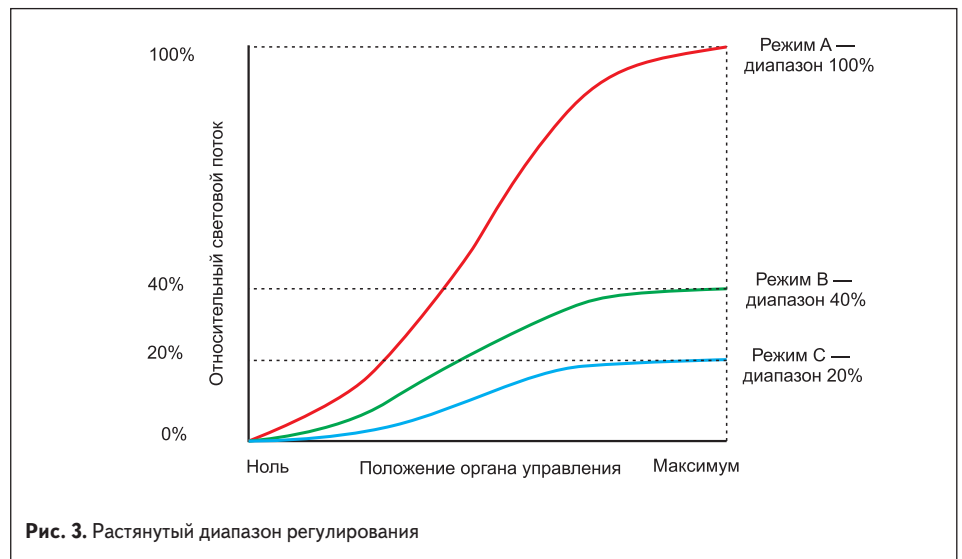


Рис. 3. Растянутый диапазон регулирования

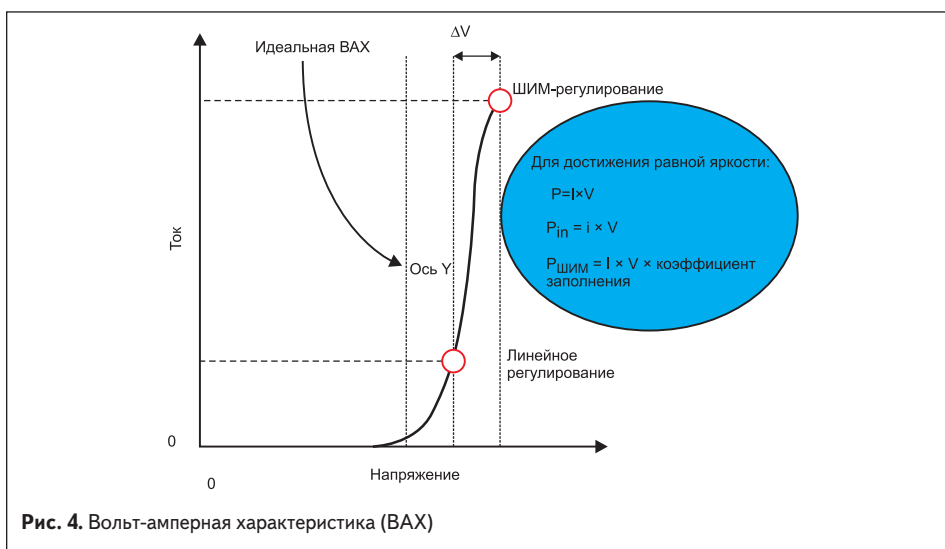


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика (ВАХ)

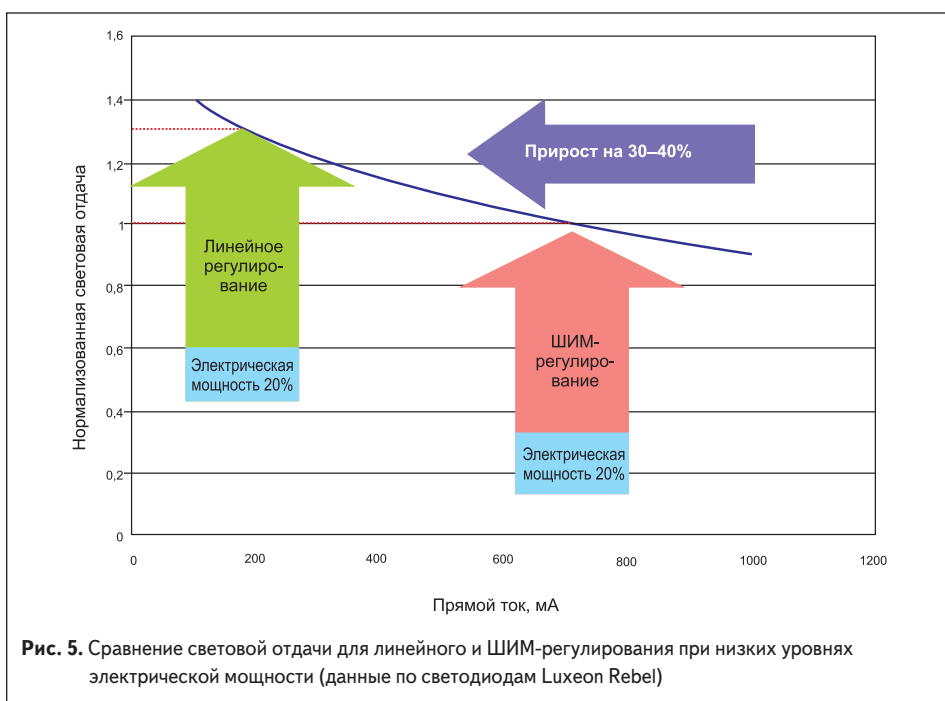


Рис. 5. Сравнение световой отдачи для линейного и ШИМ-регулирования при низких уровнях электрической мощности (данные по светодиодам Luxeon Rebel)

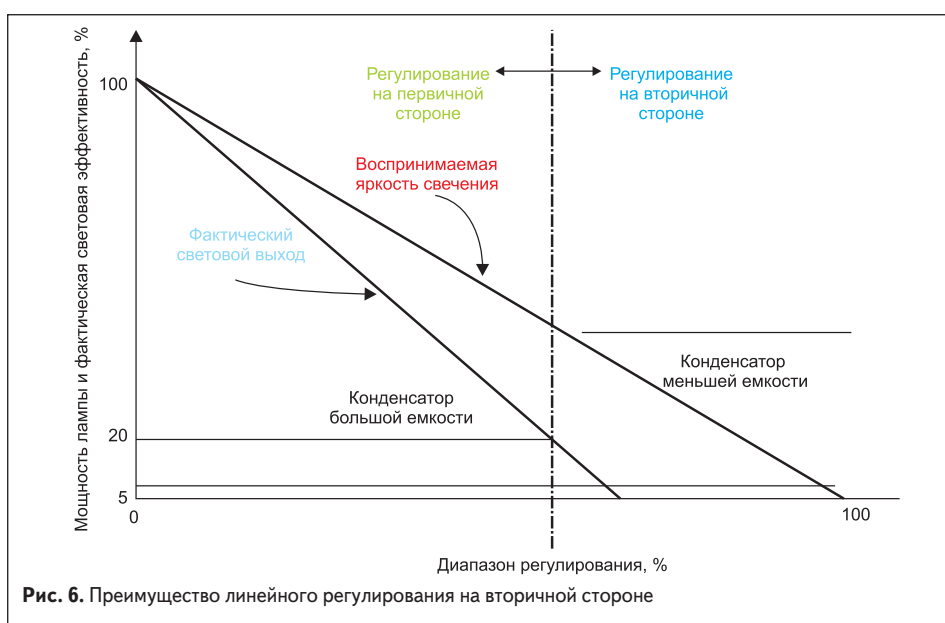


Рис. 6. Преимущество линейного регулирования на вторичной стороне

этой функции не зависит от типа используемого входного устройства или регулятора. Она обеспечивает гораздо более точное управление в случаях, когда обычным является малый уровень яркости.

Еще один класс решений, связанных с рациональным линейным регулированием яркости, предполагает наличие нескольких характеристических кривых, в том числе логарифмической, линейной и заданной пользователем. Выбор требуемой характеристики производится так, как описано в предыдущем абзаце. На рис. 3 показаны три S-образные характеристические кривые с разными максимальными уровнями яркости, воспроизводящие поведение лампы накаливания. Например, режим С лучше всего подойдет для использования в ресторанах во время рабочего дня, а режим А — для уборки после закрытия и утренней подготовки. Режим С позволит создать в заведении желаемую атмосферу, манипулируя уровнями освещенности.

Привлекательная особенность линейного регулирования — меньший ток в том же диапазоне напряжений, чем при широтно-импульсной модуляции, которая работает за счет изменения коэффициента заполнения, а следовательно, и среднего тока. Итогом является более низкое энергопотребление, больший КПД и меньшее прямое напряжение (рис. 4).

Интеллектуальное линейное регулирование как общий метод имеет и другие преимущества, особенно применительно к изменению яркости на низких уровнях. Хорошо известный эффект «просадки» эффективности излучения светодиода, возникающий при больших значениях тока, в данном случае отсутствует благодаря реальному снижению мгновенных значений тока через *p-n*-переход. Это существенное улучшение: оно соответствует 30–40%-ному приросту общего светового выхода на нижнем участке диапазона регулирования яркости лампы (рис. 6). Данный режим работы отличается также большей экономичностью за счет самых низких уровней яркости в сравнении с традиционными режимами ШИМ-регулирования.

На рис. 5 представлен более конкретный анализ КПД. Он четко демонстрирует разницу в общей световой отдаче типичного светодиода Luxeon Rebel в случае линейного и ШИМ-регулирования при типовом пониженном уровне электрической мощности, равном 20%. Влияние просадки тока на общую световую отдачу светодиода здесь значительно более выражено (в предположении постоянной температуры *p-n*-перехода). В обеих системах установлен эффективный уровень электрической мощности 20%, но при этом световая отдача системы с линейным регулированием (коэффициент заполнения 100%, ток 150 мА) оказывается на 30% выше, чем у системы с ШИМ-регулированием (коэффициент заполнения 20%, ток 750 мА).

## Линейное регулирование

В большинстве импульсных источников питания и схем управления светодиодами первичная и вторичная стороны (последних может быть несколько) электрически/физи-

чески отделены друг от друга трансформатором или обратнoходoвым дросселем.

Почти все крупные компании — производители полупроводниковых компонентов, производящие ИС источников питания и управления светодиодами, используют одну и ту же технику регулирования — а именно регулирование на первичной стороне. Однако прямое управление на вторичной стороне для таких компонентов обладает множеством практических преимуществ, что демонстрирует технология LV4 компании Light-Based Technologies.

На рис. 6 можно видеть, что при топологии с ШИМ-регулированием воспринимаемая яркость свечения составляет 20% при фактической мощности 5%. Подход с линейным регулированием позволяет добиться близкой к нулю воспринимаемой яркости свечения при уменьшении фактической мощности до нуля. Это позволило бы на практике реализовать диапазон регулирования от 100 до 10%, который обычно заявляется в технических характеристиках ШИМ-регуляторов.

Очевидно, что соотношение между измененным значением светового выхода и воспринимаемой яркостью достаточно линейное, со значением показателя 0,5 в формуле степенного закона Стивенса. Также компания Light-Based Technologies применяет метод, предусматривающий передачу актуальной управляющей информации с первичной стороны на вторичную, что обеспечивает возможность регулирования с малой задержкой или в реальном масштабе времени (в отношении данного метода подана заявка на патент). Контроллер с прямой нагрузкой на вторичной стороне также позволяет точно устанавливать ток нагрузки и минимальное напряжение, причем только когда это необходимо. Рис. 7 демонстрирует, в частности, повышенное разрешение в нижней части диапазона регулирования и меньшую потребляемую емкость вследствие более совершенного регулирования. Двум известным производителям ИС контроллеров удалось достичь цифры 0,1%: в одном случае путем использования конденсаторов большой емкости с их малым временем наработки на отказ, большой стоимостью и размерами, а в другом — за счет отказа от соблюдения требований гальванической развязки.

### Ток удержания регулятора

Еще один фактор, который необходимо учесть для достижения совместимости регуляторов, заключается в том, что все переднефронтовые регуляторы на симметричных тиристорах (LEDIM) требуют определенного тока удержания, который обусловлен внутренней архитектурой и характеристиками их электронных компонентов. Иными словами, они полностью выключаются, когда через них прекращает течь ток, из-за чего свет мерцает или даже гаснет на протяжении этого периода (в зависимости от того, способна ли схема управления произвести перезапуск). Это, разумеется, происходит периодически — каждый раз, когда кривая переменного напряжения входит в окрестность нуля или покидает ее.

Во многих конструкциях ток удержания может создаваться простой низкоомной резистивной нагрузкой, но пропускание фиксированного тока на протяжении всего периода приводит к нерациональному расходованию энергии. По-настоящему эффективным будет такой формирователь тока удержания, который включается только при недостаточном токе нагрузки, в конкретный момент времени и на необходимый минимум, определяемый потребным током нагрузки и регулятора. Для рационального выполнения этих функций требуется схема с динамическим и периодическим характером работы — например такая, как формирователь тока удержания компании Light-Based Technologies. Это практичное решение, поскольку потребный ток удержания тиристорov существенно варьируется в зависимости от номинальной мощности тиристора, колебаний свойств полупроводниковых материалов и внутренней конструкции компонента конкретного производителя.

На рис. 8 показаны результаты моделирования в программе SPICE, демонстрирующие динамический и периодический характер работы схемы компании Light-Based Technology. Фактическое значение динамического тока удержания (ток через R42) определяется как требованиями нагрузки, так и характеристиками конкретного тиристорного или полупроводникового регулятора. Участок рабочего цикла примерно с 8 до 11 мс характеризуется достаточно низким импедансом и очень малым током, чтобы соблюсти требования симметричного тиристора к минимальному току удержания. На верхнем рисунке для ориентировки показана полуволна переменного напряжения переднефронтового регулятора при уровне 25% по шкале регулирования (измерение производилось за мостовым выпрямителем, но до фильтра).

Заднефронтовым регуляторам (TEDIM) также требуется ток удержания, но по другим причинам. Роль активных компонентов в них обычно играют полевые МОП-транзисторы и БТИЗ. Эти



Рис. 7. Сравнительные преимущества линейного регулирования яркости

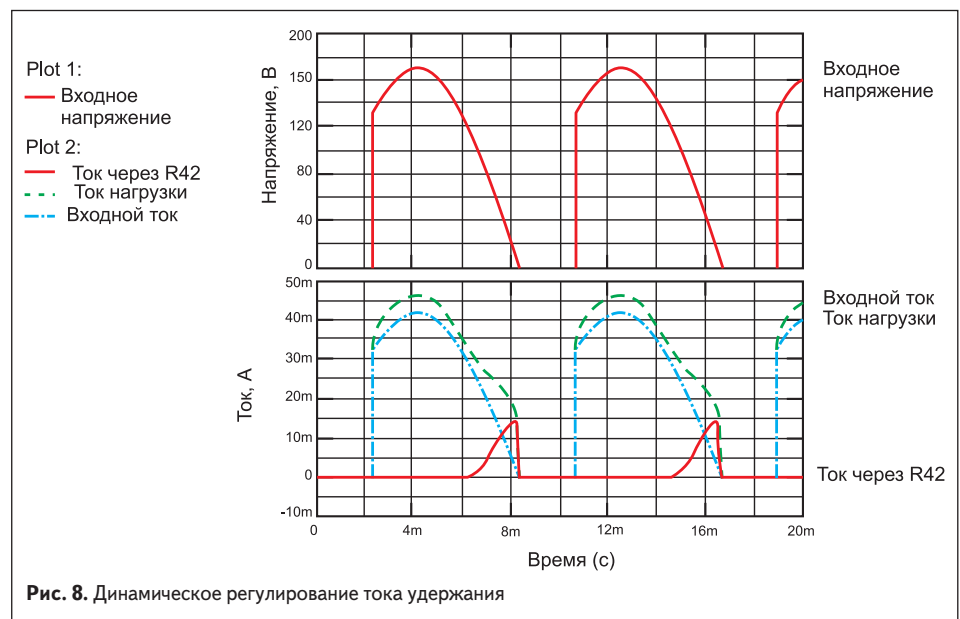


Рис. 8. Динамическое регулирование тока удержания

устройства также перестают работать правильно при отсутствии на них напряжения (что происходит на протяжении каждого периода сигнала). Выключение происходит по слегка наклонной кривой, а не почти мгновенно. Поэтому в отсутствие тока удержания качество регулирования ухудшается, что опять-таки приводит к необходимости динамически регулировать ток удержания для обеспечения плавной работы и максимального КПД.

## КПД

Каждый элемент светодиодной осветительной системы имеет свой КПД, и на сегодня значение в 100% является недостижимым. Энергия теряется в каждом компоненте, в том числе в схеме управления светодиодами или источнике питания, в самом светодиоде, в оптике (линзах или светорассеивателях), отражателях (если они используются). Плохое регулирование тепловых режимов может вызывать постепенное изменение (как правило, в сторону понижения) светового выхода в самом зазоре светодиода.

Соответственно, при увеличении КПД любого из этих компонентов даже на единицы процентов общий его природо оказывается значительным. Разница в стоимости технических решений и относительная незрелость технологий и рынка светодиодных светильников как никогда мотивирует инженеров на внесение как можно большего количества усовершенствований — сильнее, чем в случае скромных светильников на лампах накаливания и люминесцентных лампах, ныне стремительно уходящих в прошлое.

В общем случае КПД источника питания или схемы управления светодиодом может быть выражен следующим образом:

$$W = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} \text{ или } W = (V \times I_{\text{вых}})/(V \times I_{\text{вх}}).$$

Простейшая формула КПД [%] схемы управления светодиодом такова:

$$\text{КПД} = (P_{\text{вых}} \times 100)/P_{\text{вх}}.$$

Световая отдача светодиода выражается в лм/Вт, световой поток — в лм. Показатель преломления  $n$  и общий коэффициент прозрачности линзы  $t$  [%] выражаются следующим образом:

$$n = \text{скорость света в вакууме/скорость света в среде};$$

$$t = \text{световой поток (вых.)} \times 100 / \text{световой поток (вх.)}.$$

КПД отражателя определяется следующим выражением:

$$\text{световой поток пад. (вых.)} \times 100 / \text{световой поток пад. (вх.)}.$$

КПД системы необходимо рассматривать во всем диапазоне регулирования яркости. Нормируется ли КПД в современных тиристор-

ных регуляторах, используемых в светодиодных светильниках и схемах управления светодиодами? Хороший вопрос! В регуляторах старого образца применяются диссипативные резистивные элементы, а современные регуляторы (в особенности на полевых МОП-транзисторах) больше похожи на управляемые переключатели. Но ничего идеального не бывает, и все компоненты имеют определенное эквивалентное последовательное сопротивление, на котором происходят тепловые потери. Во время нормальной работы регуляторы яркости становятся теплыми на ощупь. КПД фазового регулятора обычно составляет около 99%. Оставшийся процент рассеивается в регуляторе в виде тепла. Таким образом, регулятор с нагрузкой 600 Вт будет выделять около 6 Вт тепла, а с нагрузкой 1 кВт — около 10 Вт. Стандартами UL/CSA нормируется предельная температура поверхностей, на которых рассеивается это тепло; обычно она равна 60 °C (140 °F).

## Важность коэффициента мощности

В идеале под коэффициентом мощности понимается просто степень синфазности напряжения на нагрузке и потребляемого тока в каждом полупериоде синусоидального сигнала. Их фазы должны совпадать, как на чисто активной нагрузке. Коэффициент мощности определяется как отношение активной мощности к полной мощности. В зависимости от «типа» нагрузки ток на ней может опережать напряжение или отставать от него (рис. 9).

Обе разновидности регуляторов яркости (будь то с линейной, нелинейной, комбинированной или сложной нагрузкой) оказывают сильное влияние на коэффициент мощности: обычно они обрезают фазу напряжения на пике мощности, как того требует нагрузка, за счет чего в сети переменного тока возникают несогласование и гармонические нелинейные искажения (рис. 10).

Искажение коэффициента мощности (DPF) — это мера уменьшения средней мощности, передаваемой на нагрузку, вследствие гармонических искажений тока. Оно определяется по следующей формуле:

$$\text{DPF} = 1/\sqrt{1 + \text{THD}_i^2} = I_{1\text{rms}}/I_{\text{rms}},$$

Здесь  $\text{THD}_i$  — суммарный коэффициент гармоник. Данное определение предполагает, что форма напряжения не искажается (оно остается синусоидальным без гармоник). Такое упрощение является зачастую хорошим практическим приближением.  $I_{1\text{rms}}$  — среднеквадратичная амплитуда основной частоты тока, а  $I_{\text{rms}}$  — среднеквадратичный полный ток. Умножив их отношение на величину искажения коэффициента мощности, получаем истинный коэффициент мощности (PF):

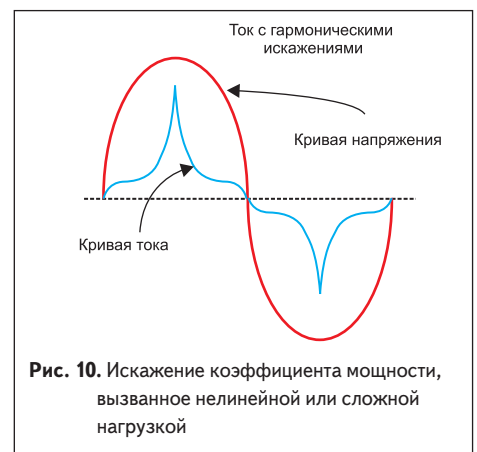
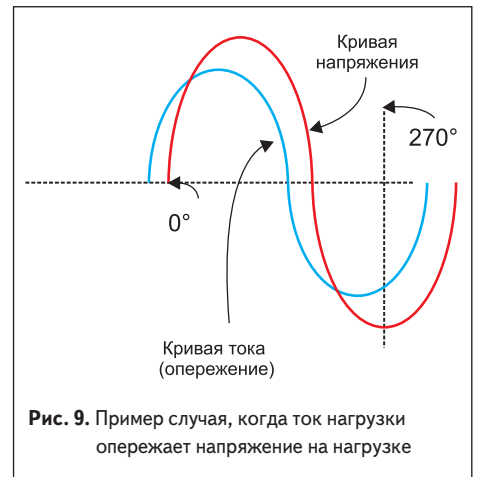
$$\text{PF} = \text{DPF} \times (I_{1\text{rms}}/I_{\text{rms}}).$$

Искажение коэффициента мощности редко имеет какие-либо ощутимые последствия для

бытовых пользователей, но для промышленных пользователей оно может выливаться в дополнительные расходы на оплату электроэнергии. Например, если нагрузка имеет резко индуктивный характер, может возникнуть необходимость в установке коммутируемой батареи конденсаторов для компенсации потерь мощности. На уровне жилого фонда энергосбытовыми компаниями приходится тратить средства на оборудование и дополнительную мощность для исправления этого дисбаланса в масштабах всей распределительной системы.

Схемы управления светодиодами и импульсные источники питания считаются нелинейными или сложными нагрузками и требуют коррекции коэффициента мощности для уменьшения создаваемых ими нелинейных искажений тока с образованием избыточной энергии на гармониках промышленной частоты (рис. 10).

Содержание гармоник и основные требования к коррекции коэффициента мощности для всех импульсных источников питания регулируются европейским стандартом EN61000-3-2. Пассивная коррекция коэффициента мощности в схемах управления светодиодами и источниках питания обычно реализуется с помощью дополнительных конденсаторов, резисторов и управляющих диодов (цепи «заполнения впадин»). Активная коррекция коэффициента мощности достигается также путем перераспределения тока в полупериоде волны напряжения. Суть решаемой задачи — в том, как улучшить стабилизацию на нагрузке без снижения коэффициента мощности или



сделать нагрузку эквивалентной линейному резистору. Обычно для этого применяется двухкаскадная топология источника или схемы управления (повышающая, понижающая или понижающе-повышающая).

В настоящее время компания Light-Based Technologies разрабатывает новую конструкцию источника питания/схемы управления светодиодами, в которой используется принципиально новая топология для уменьшения искажений коэффициента мощности и повышения КПД.

### Мощность и воспринимаемая яркость свечения

Соотношение между фактическим и воспринимаемым уменьшением яркости свечения имеет логарифмический характер (рис. 11). Уменьшение яркости до 25% от максимальной воспринимается человеком примерно как половинное и т. д. Однако в нижних 3–5% диапазона регулирования, приходящихся на последний небольшой участок рабочего диапазона движкового или поворотного потенциометра, снижение яркости происходит отнюдь не идеально. Регулирование в узком диапазоне едва воспринимается глазом. Аналогичную природу имеет человеческий слух: чтобы слушатель ощутил изменение громкости, необходимо относительно большое изменение фактической мощности звука. Современные светодиодные лампы, предназначенные для установки в традиционные осветительные системы, с трудом обеспечивают приемлемые для массового рынка яркость и качество освещения. Многие еще остается сделать для того, чтобы повысить планку яркости, мощности, КПД и эффективности регулирования тепловых режимов до уровня, пригодного для коммерциализации. Хорошая новость состоит в том, что прогресс на этом пути по-прежнему идет, и компания Light-Based Technologies считает за честь быть на переднем крае инноваций в этой интереснейшей сфере.

С чисто прагматической точки зрения регулирование яркости светодиодного освещения позволяет экономить деньги за счет нескольких факторов. В частности, это непосредственное снижение энергопотребления и затрат на обслуживание и замену, что продлевает

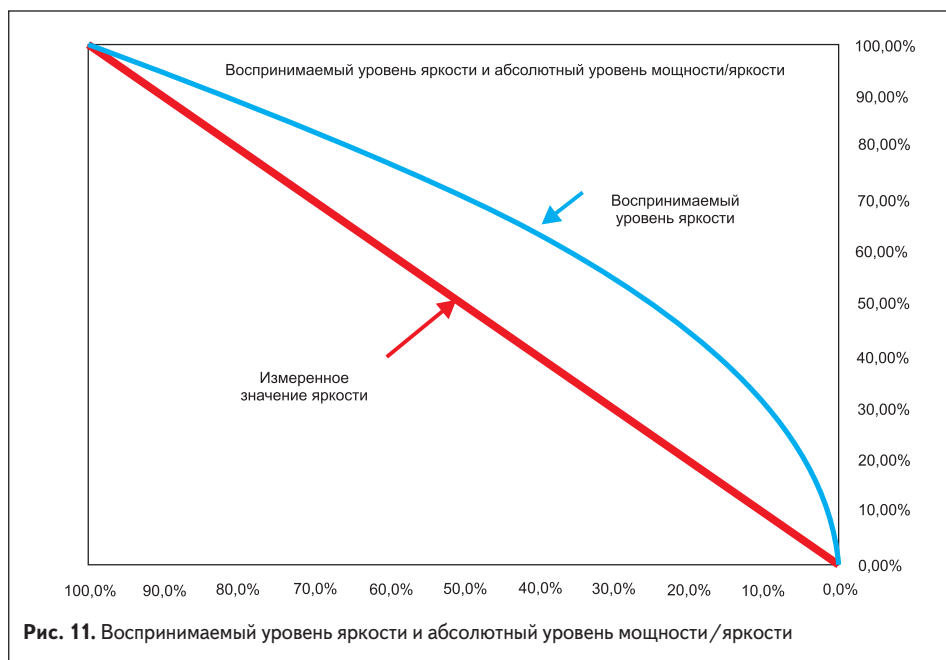


Рис. 11. Воспринимаемый уровень яркости и абсолютный уровень мощности/яркости

срок службы самого светильника. Любой регулятор по сравнению с обычным двухпозиционным выключателем автоматически экономит 4–9% электроэнергии даже при максимальной яркости. А если пользователь приглушает свет, экономия возрастает. Ввиду своих динамических характеристик тиристоры не включаются точно в момент пересечения нуля сигналом переменного тока, поэтому даже при полном открытии происходит небольшое урезание фазы до достижения порогового напряжения.

Эстетические требования к высококачественному регулятору яркости светодиодной лампы таковы: управляемый диапазон регулирования, программируемая кривая регулирования, плавные переходы, хороший пуск и прогрев, стабильная яркость во всем диапазоне регулирования, стабильная цветность или программируемая цветовая коррекция в процессе регулирования, низкий уровень акустических шумов и ЭМП, гибкость управления/пользовательского ввода, малые искажения коэффициента мощности и приятное для пользователя всестороннее управление цветностью.

Технические требования к высококачественному регулятору яркости светодиодной лампы: широкий рабочий диапазон входных переменных напряжений, широкий диапазон приемлемых форм входного сигнала, как можно более высокий КПД, отсутствие мерцания и ступенчатых переходов в нижней части диапазона регулирования, отсутствие резкого погасания света, плавное регулирование в диапазоне 0–100%, малый уровень нелинейных искажений (THD), малые искажения коэффициента мощности, низкий уровень ЭМП и радиочастотных шумов, работа при минимальном напряжении, стабилизация тока и малый бросок пускового тока.

Регулирование яркости светодиодных ламп, так же как и менее эффективных люминесцентных, — непростая задача. Однако тщательное проектирование позволяет добиться характеристик регулирования, свойственных традиционным фазовым регуляторам яркости ламп накаливания. ●

**Примечание.** Оригинал статьи опубликован на сайте [www.led-professional.com](http://www.led-professional.com).