

Сергей Гужов | Александр Полищук | Андрей Туркин |

Сети уличного освещения

с полупроводниковыми управляющими устройствами
и источниками света: управление и расчет режимов

Установки наружного освещения — один из важнейших элементов благоустройства городов и населенных пунктов. Они во многом обеспечивают безопасность движения автотранспорта и пешеходов, зрительную ориентацию людей в пространстве улиц и площадей, а также внешний облик населенного пункта в темное время суток.

Сегодня технический уровень любой отрасли промышленности определяется количеством используемой в ней электроники. Благодаря созданию электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭПРА) и систем управления освещением (СУО) началось широкое внедрение электроники в светотехнику, что уже привело к резкому улучшению параметров осветительных приборов, качества освещения и экономии электроэнергии.

В городском освещении подобные устройства используются в качестве пускорегулирующей аппаратуры в осветительных приборах на основе люминесцентных (ЛЛ) и, особенно, компактных люминесцентных ламп (КЛЛ), натриевых ламп типа ДНаТ, серных ламп, а также в осветительных приборах на основе светодиодов. Подобное внедрение обуславливается тем, что все перечисленные источники

света (ИС) нуждаются не в стандартном сетевом переменном напряжении 220 В, а в специально преобразованном.

С развитием полупроводниковых технологий стало понятно, что сокращения расхода электрической энергии в наружном освещении следует добиваться не только путем частичного или полного отключения световых приборов в осветительных установках (ОУ), а также за счет более широкого внедрения высокоэффективных источников света и светильников с рациональным светораспределением. Таким требованиям максимально соответствуют светодиодные светильники (СДС).

Твердотельные полупроводниковые источники света вошли в светотехнику как класс осветительных приборов сравнительно недавно. Их выход на рынок практически совпал с наступлением нового тысячелетия. За последнее десятилетие производители

светодиодных ИС достигли значительных успехов, в результате чего в настоящее время замена, например, обычной лампы накаливания (ЛН) на ее светодиодный аналог не кажется событием из области фантастики. Основные преимущества СДС состоят в значительном сроке службы без снижения светотехнических характеристик (до 70 тыс. часов), неприхотливости в эксплуатации, миниатюрности и низкой потребляемой мощности при сохранении прочих показателей для аналогичных источников света (ИС). Световая отдача современных светодиодов сегодня вплотную подошла к отметке 100 лм/Вт, что позволяет им конкурировать с такими передовыми ИС, как КЛЛ и лампы типа ДНаТ.

Начиная с 2007 года, ряд светодиодных компаний в России совместно с ГУП «Моссвет» приступили к разработке светильников для уличного освещения. Ведущая в этой области компания ProSoft в конце 2007 года осуществила поставку СДС для установки в пешеходных переходах. На рис. 1 изображена фотография такого подземного перехода в Москве, около станции метро «Рижская».

Светодиодные светильники ДВУ-25 совместного производства компаний XLight и «Светосервис» были установлены на опытную эксплуатацию в начале сентября 2007 года [1, 2]. В процессе опытной эксплуатации светильников ДВУ-25, изготовленных на основе мощных светодиодов Cree Xlamp, не было выявлено серьезных недостатков в их работе, и можно утверждать, что подобные светодиодные светильники могут быть использованы в городском освещении. Следующий шаг — прямая замена уличных светильников, используемых для освещения дорог и тротуаров с фонарных столбов высотой 6–8 м. На территории Москвы сегодня для подобных целей используются в основном лампы типа ДНаТ-150 и ДНаТ-250. В то же время существующие светодиодные аналоги имеют потребляемую мощность в максимальном режиме соответственно 90 и 120 Вт.

Примеры замены ламповых уличных светильников на светодиодные уже есть. Самым известным, наверное, является проект «Светодиодный город» (LED City) в США [3], который предполагает полный перевод города Роли, столицы штата Северная Каролина, на светодиодное освещение. О подобных широкомасштабных проектах пока нигде в мире не объявлено,



Рис. 1. Светильники ДВУ-25 на основе светодиодов Cree Xlamp в подземном переходе в Москве

но существуют небольшие проекты локальной замены в уличном освещении ламповых светильников на светодиодные.

На рис. 2 показан пример такой замены, проведенной в освещении парка в городе Парма в Италии. Важным преимуществом светильников, установленных здесь, является оптическая система, позволяющая получить кривую силы света, требуемую по стандартам для уличных светильников.

Светильники установлены на высоте 4 м, расстояние между столбами составляет 24 м. Средний уровень освещенности, обеспечиваемый такими светильниками, составляет примерно 10 люкс при неоднородности 0,57. Потребляют данные светильники 20 Вт и имеют опцию изменения светового потока в зависимости от уровня естественной освещенности, что позволит существенно сократить потребление электрической энергии.

Обеспечение экономичности осветительных установок — это вторая по важности проблема после обеспечения их эффективности. Существенное значение имеет решение задач гибкого использования различных инженерных методов и способов обеспечения принятой совокупности показателей проектируемой осветительной установки. В частности, автоматическое включение/отключение осветительных установок в зависимости от уровней естественной освещенности (или применение интеллектуальной системы управления уличным освещением).

Главные цели в области наружного освещения городов в настоящее время — это разработка новой концепции освещения городских пространств, учитывающей все зоны города:

- улицы с проезжей частью и тротуарами;
- дворовые проезды и пешеходные проходы до подъездов жилых зданий;
- дворовые пространства — детские и спортивные площадки, зоны отдыха, стоянки автотранспорта и т. п.

При этом важно производить учет совокупного влияния установок наружного освещения, включая освещение уличного пространства и зон общественного отдыха, освещение витрин магазинов и прочих осветительных устройств различного функционального назначения на формирование световой среды города в целом.

Таким образом, модернизированная СУО должна выполнять следующие функции:

1. Обеспечивать постоянство освещенности в условиях плохой погоды, облачности и смога за счет диммирования ИС.
2. Обеспечивать возможность автоматического регулирования в различных точках одной ОУ наиболее приемлемой освещенности.
3. Учитывать присутствие людей и интенсивность потока автотранспорта и отключать в определенные ночные часы часть светильников, расположение которых принципиально не влияет на общий уровень освещенности и уровень безопасности.
4. Учитывать время суток, года, дни недели путем индивидуального регулирования светового потока каждого ИС.

На рис. 3 представлена структурная схема СУО. Многие фирмы (Osram, Philips, Tridonic,



Рис. 2. Уличные светодиодные светильники в парке города Пармы, Италия

Helvar, ЭНЭФ и др.) производят готовые СУО для осветительных установок с различными источниками света. Регулирование светового потока в СУО должно быть как автоматическим — от датчиков освещенности, присутствия и времени, так и ручным (непосредственно работающим).

В журнале «Светотехника» (1997, № 1) была подробно описана типовая СУО [4]. Для унификации ее элементов и «понимания» элементами одного производителя команд датчиков других производителей европейские фирмы разработали и внедрили ряд стандартов, которые активно применяются и в России. В настоящее время наиболее широко используемыми стандартами в области освещения зданий являются LON, EIB, KNX. При создании интеллектуальной системы управления уличным освещением можно задействовать любую из указанных систем, либо отдать предпочтение иной системе, разработанной производителем драйверов и СДС.

В системах с аналоговым управлением команды ручного управления или сигналы от датчиков освещенности, присутствия и времени подаются на управляющие входы полупроводникового блока питания (ППБП) в виде постоянного напряжения (в диапазоне 0–10 В), что вызывает соответствующее изменение светового потока управляемых ламп.

В качестве датчика освещенности может использоваться, в принципе, любой светочув-

ствительный прибор; обычно это фотодиод или фоторезистор. Они могут и изменять световой поток ламп в зависимости от уровня естественной освещенности так, чтобы суммарная освещенность оставалась постоянной. Поддерживаемый уровень освещенности задается при установке датчиков. Улучшенные приборы, кроме датчиков освещенности, содержат и датчики присутствия. Значит, существует возможность выключать часть осветительных приборов в ночное время при отсутствии людей.

Программное управление — это осуществление оперативных переключений по таймеру в соответствии с временной программой, определенной для каждого дня года.

Ручное управление, как правило, осуществляется дистанционно с помощью пультов с инфракрасными излучателями или с центрального диспетчерского пульта.

В отличие от аналоговых систем, цифровое управление по любому из стандартов позволяет реализовывать программирование освещения и осуществлять адресное управление светильниками. При этом управляющие драйверы сохраняют в памяти заданный уровень мощности ламп и при повторном включении сразу включают светильники с этим уровнем. Кроме того, система может передавать на управляющие блоки сигналы о неисправностях ламп, неподключенных ЭПРА, обрывах проводов питающей сети и т. п. [5].

В настоящее время ассортимент ППБП насчитывает многие десятки типоразмеров, отличающихся количеством и мощностью включаемых с ними ламп, наличием или отсутствием возможности регулирования светового потока, характером включения, наличием функций защиты аппарата и электросети от возможных аварийных ситуаций. При всем кажущемся многообразии схемные решения современных драйверов ведущих мировых производителей, в принципе, одинаковы.

Конструктивно СДС состоит из двух блоков — светоизлучающей части и полупроводникового

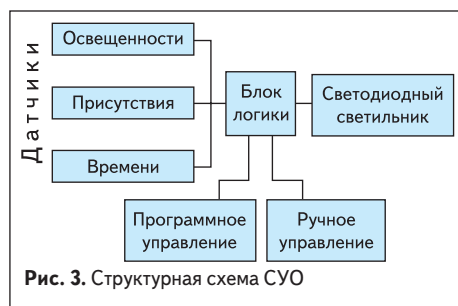
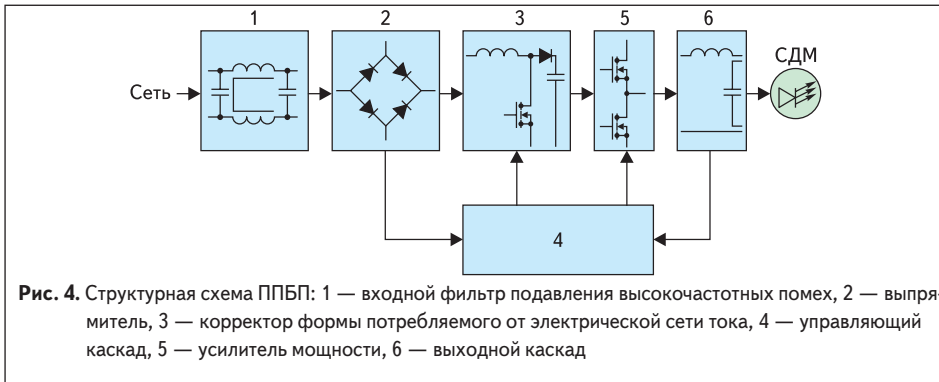


Рис. 3. Структурная схема СУО



блока питания (ППБП), называемого драйвером или управляющим элементом. На рис. 4 показана структурная схема современного ППБП, содержащая все основные узлы. Фактически различия схем ППБП заключается, в основном, в принципиальной схеме управляющего каскада и в типе применяемого фильтра подавления высокочастотных помех, так как остальные узлы к настоящему времени отработаны настолько, что являются практически унифицированными.

При этом электротехнические возможности драйверов значительно превосходят возможности обыкновенных ЭПРА [6]. Например, драйвер способен поддерживать требуемые параметры тока и напряжения на светодиодной сборке при значительных колебаниях напряжения — от 70 до 150% (154–330 В). При этом отклонение значения напряжения от 220 В никак не сказывается на сроке службы ни самого драйвера, ни, тем более, на сроке службы светодиодной сборки. Следовательно, при реконструкции или проектировании вновь создаваемой ОУ на СДС возникает возможность отойти от указанных в ПУЭ границ допустимых отклонений напряжения $\pm 5\% U_{ном}$. Это означает, что при проектировании уличной осветительной сети отпадает главный ограничивающий фактор — проверка по падению напряжения. Появляется возможность создавать значительно более длинные осветительные сети. А в условиях модернизации существующих сетей города — просто объединять несколько существующих линий последовательно.

Увеличение средней длины групповой линии осветительной сети открывает широкомасштабные перспективы для изменения самой концепции построения осветительной сети города. При сохранении единичной мощности ТП, принадлежащих ГУП «Моссвет», значительно увеличивается площадь их покрытия. А значит, появляется возможность вывода из эксплуатации в сети освещения около трети существующих ТП и РП. А при экономии до 2/3 потребляемой сегодня электроэнергии за счет перехода на более экономичные светодиодные светильники открываются перспективы по снижению затрат по первой ставке двухставочного тарифа на электроэнергию.

Однако основной сложностью с точки зрения электротехники при создании такой системы является расчет электромагнитной обстановки в питающей сети существующего района с точки зрения гармонических составляющих тока,

генерируемых полупроводниковыми блоками питания используемых светильников, с одной стороны, и наличием несинусоидальности тока в питающей сети района — с другой.

Для подавления высокочастотных помех, создаваемых ЭПРА в электрической сети тока, используются обычные или двойные П-образные фильтры из индуктивностей в несколько мГн и емкостей до 1000 нФ. Как правило, дополнительно для этой же цели включается емкость порядка единиц нФ между одним из питающих проводников (обычно нейтралью) и заземляющим проводом. В качестве выпрямителя, как правило, используется любой стандартный мостик, рассчитанный на соответствующие токи и напряжения. Для коррекции формы потребляемого тока применяются достаточно мощные полевые транзисторы, управляемые специальными устройствами, отслеживающими форму тока.

Электрические параметры ППБП различных фирм практически одинаковы: КПД — 86–94%; коэффициент мощности — как правило, не ниже 0,95 и в большинстве случаев зависит от используемых емкостных элементов; сетевые ППБП нормально работают в диапазоне напряжений 80–360 В и практически все могут работать от сетей постоянного напряжения с разбросом 170–340 В; содержание высших гармоник в потребляемом токе — обычно не выше 15%.

Поскольку большинство светодиодных осветительных приборов не являются отечественными разработками, то и устройства, управляющие их работой, также поступают из-за рубежа. Преимущества этого состоят в наличии драйверов для их работы, серийного производства изделий и комплектующих, а также в большом разнообразии предлагаемой продукции. Основной же недостаток — в том, что нормы, на которые ориентировались разработчики, зачастую расходятся с российскими аналогами.

В области искажения синусоидальной кривой тока производители ориентируются на общий коэффициент несинусоидальности. Этот фактор показывает степень отклонения реальной формы тока от идеальной синусоиды и измеряется в процентах. Недостатком подобной системы оценки является общность подхода и невозможность оценить эмиссию гармонических составляющих тока по каждой из гармоник. В РФ существует ГОСТ Р 51317.3.2-99 «Эмиссия гармонических составляющих тока техническим средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе)». В этом документе описаны

пределы для каждой из гармоник вплоть до 2 кГц, превышение которых является недопустимым. Этот подход позволяет более точно оценивать испытуемый прибор, а значит, точнее указать производителю направление доработки. И если в первом случае при наличии резкого превышения эмиссии тока ни одной из гармоник можно удержать $K_{и.с.}$ в пределах нормы за счет общего снижения уровня остальных гармоник, что несомненно дешевле, то в российских нормах такой подход исключен за счет иного построения предъявляемых требований.

С началом внедрения СДС оказалось, что ППБП имеют превышение эмиссии составляющих рабочего тока в области высших гармоник. В связи с этим возникла необходимость предварительного расчета ОУ с точки зрения наличия в ней искаженной формы тока по всему гармоническому ряду.

В настоящий момент существует несколько теорий расчета линий, используемых в разных областях электротехники. Это теория антенн в радиотехнике, теория длинных линий и теория Ленца (теория Кирхгофа) — в электротехнике. Используя описанные здесь методы, учитывают возможность расчета несинусоидальных режимов, однако подобные расчеты сложны даже с использованием компьютерной техники, так как связаны с моделированием точного аналога сети и решением сложных дифференциальных уравнений, составленных на основе схем замещения. Недостаток методов еще и в том, что они не гибки, так как требуют индивидуального подхода при моделировании каждой из линий [7].

В качестве альтернативного метода расчета установившихся режимов в сети с наличием несинусоидальности предлагается рассматривать метод, основанный на теории четырехполюсников. Данный метод позволяет оперировать «черным ящиком» вместо моделирования сложных управляющих устройств. Необходимые данные при этом — входные и выходные ток и напряжение.

В таком случае осветительную сеть уличного освещения можно представить в виде каскадного соединения типовых четырехполюсников, количество которых равно числу светильников в группе. В состав такого четырехполюсника входит часть групповой сети длиной, равной расстоянию между двумя электроприемниками, и СДС с драйвером. При этом две составные части также можно считать четырехполюсниками и анализировать соответственно (рис. 5) [8]. Любой четырехполюсник можно описать через матрицу А-коэффициентов. Параметры А-матрицы можно определить как расчетным путем, исходя из схемы замещения исследуемого объекта, так и опытным путем. Схема замещения групповой линии ОУ представлена на рис. 5 (II). Эта схема является наиболее полной и общепринятой при расчете подобных схем замещения. Параметры схемы могут быть рассчитаны для основной частоты, а значит, поддаются определению на всем ряде частот. Расчетные параметры для длинных линий рассчитываются по следующим формулам: погонная индуктивность, мкГн/м — $L_1 = 0,4 \ln(d/r)$;

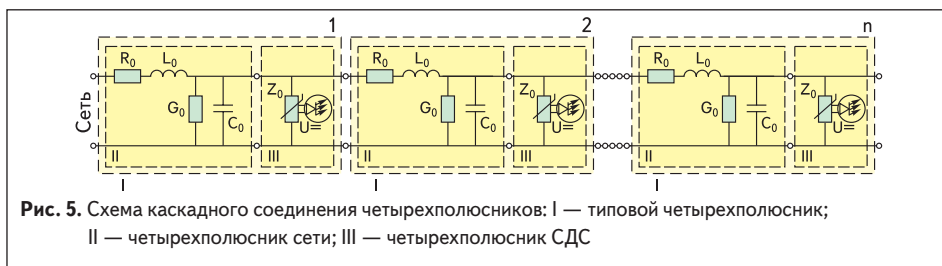


Рис. 5. Схема каскадного соединения четырехполюсников: I — типовой четырехполюсник; II — четырехполюсник сети; III — четырехполюсник СДС

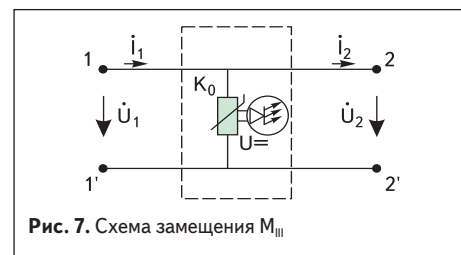


Рис. 7. Схема замещения M_{III}

погонная емкость — $C_1 = 27,8\epsilon_r/\ln(d/r)$ пФ/мп = $27,8\epsilon_r/\ln(d/r) \times 10^{-12}$ Ф/мФ;
 погонное сопротивление, Ом/м, (для меди $\sigma = 5,80 \times 10^7$ сим/м) — $R_1 = (8,32/r_{см})\sqrt{f_{Гц}} \times 10^{-6} = 1,44/(r_{мм}\sqrt{\lambda_{м}})$;
 погонная проводимость — $G_1 = \omega \times C_1 \times \text{tg}\delta$, сим/м.
 Здесь ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость; δ — угол диэлектрических потерь, r — радиус жилы, d — расстояние между жилами.

A-матрица четырехполюсника (M_{II}), представленного на рис. 6, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 1 + (r_0 + kl_0)(g_0 + kc_0) & r_0 + kl_0 \\ g_0 + kc_0 & 1 \end{bmatrix}$$

Электрическая схема драйвера является сложным комплексом, включающим в себя как емкости, индуктивности и активные сопротивления, так и разнообразные полупроводниковые элементы. Такой четырехполюсник называется активным. Активный четырехполюсник — это линейный четырехполюсник, содержащий источники энергии, за счет которых на его разомкнутых зажимах появляется напряжение. В связи с широким внедрением полупроводниковой техники в понятие активного четырехполюсника вкладывают также иной смысл. А именно — это такой четырехполюсник, активная мощность

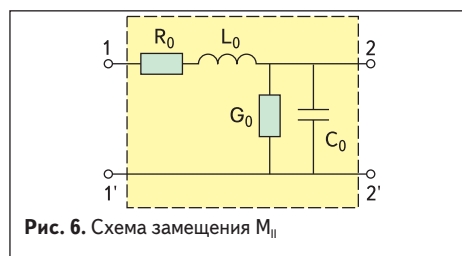


Рис. 6. Схема замещения M_{II}

на выходе которого превышает (может превышать) активную мощность на входе. Этот эффект достигается за счет того, что в состав четырехполюсника входят активные неавтономные элементы, такие как операционные усилители, транзисторы, электронные лампы, туннельные диоды и т. д. И чтобы различать эти два класса активных четырехполюсников, принято активный четырехполюсник называть «активным автономным», а четырехполюсник, способный усиливать мощность, — «активным неавтономным» в направлении усиления мощности. A-матрица для драйвера (M_{III}) представленного на рис. 7, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{K_0} & 1 \end{bmatrix}$$

Составление достоверной схемы замещения ППБП не представляется возможным в силу его разветвленной структуры. Однако, опираясь на гармонический состав тока, можно составить вольт-амперную характеристику (ВАХ) этого прибора. Реализованный на кафедре ЭПП, МЭИ (ТУ) программный продукт Rearx позволяет построить достоверно точную кривую, опираясь на исходные данные, представляемые производителем. Основная сложность расчета состоит в том, что рабочий ток на выходных зажимах, а значит, и параметры A-матрицы, зависит от напряжения на входе каждого из четырехполюсников [7]. Таким образом, расчет сети необходимо производить путем последовательного подсоединения четырехполюсников, начиная от точки их включения в сеть, для определения входных (и выходных) условий для каждого последующего элемента. После подсоединения всех элементов ОУ можно

производить расчет несинусоидальности тока в точке подсоединения к сети.

Данный метод также позволяет производить расчет сетей с учетом наличия искажений синусоидальности самого питающего тока [8–12]. В [13] приведен график амплитудных спектров тока (рис. 8).

Аналогичные гармонические ряды наблюдаются при замерах на других объектах. На рис. 9 представлен спектр эмиссии гармонических составляющих светодиодным светильником мощностью 90 Вт, аналогичным по светотехническим характеристикам ДНаТ-150. Данные представлены в процентах от тока основной частоты.

При совместной работе сети с группой светильников такого рода возможна ситуация, при которой суммирующиеся значения тока на той или иной гармонике превысят допустимое значение. Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- снижение эффективности процессов передачи и использования электроэнергии;
- снижение cosφ;
- завышение требуемой мощности электрических установок;
- старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы;
- ложное срабатывание автоматических выключателей и УЗО.

Для работы сети в штатных режимах необходимо, в том числе, соблюдение требований и по допустимым отклонениям синусоидальности тока и напряжения. Таким образом, с использованием вышеописанного метода появляется возможность рассчитать электромагнитную обстановку

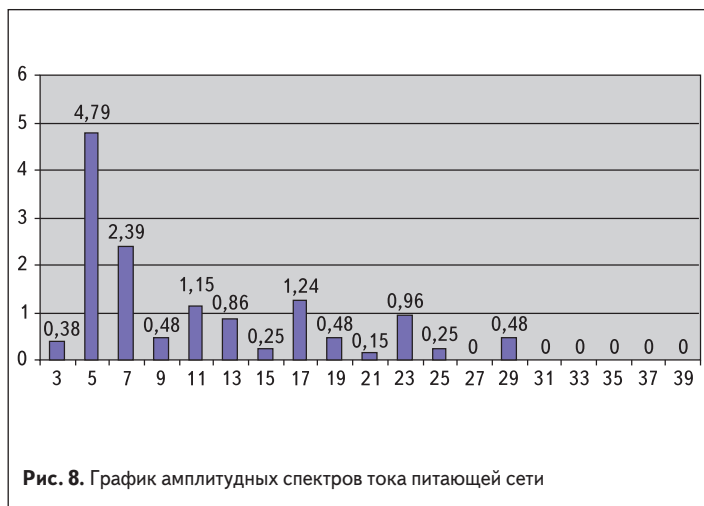


Рис. 8. График амплитудных спектров тока питающей сети

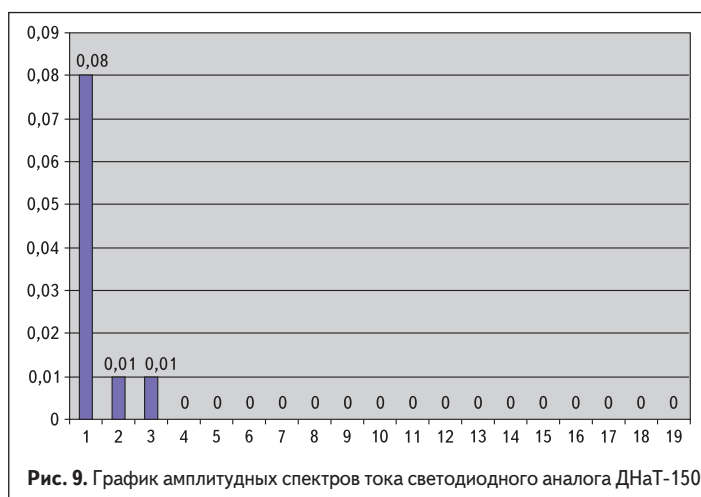


Рис. 9. График амплитудных спектров тока светодиодного аналога ДНаТ-150

исследуемой сети в области несинусоидальности тока. В практическом применении это означает, что, опираясь только на данные, предоставляемые производителем, можно индивидуально для каждого ППБП из всего спектра применяемого оборудования рассчитать максимальное количество СДС в одной группе. Описанный метод позволяет произвести подобный расчет с максимальным учетом большинства факторов реальных сетей. На основе изложенного материала сделаем следующие основные выводы:

1. Внедрение полупроводниковых преобразователей в уличное освещение городов с помощью светодиодных источников света необходимо с точки зрения улучшения облика города в целом, экономии энергоресурсов и денежных средств.
2. Современная уличная осветительная установка при работе должна учитывать множество факторов. Интеллектуальное управление освещением в данной области необходимо и является фактором снижения затрат как на электропотребление, так и на его эксплуатацию.
3. Обеспечение согласованной работы в области ЭМС для современной аппаратуры реальной сети приводит к необходимости предъявления специфических требований к качеству работы полупроводниковых преобразовательных устройств.
4. Расчет ЭМС с области несинусоидальности можно осуществлять с помощью описанной методики, учитывающей показатели несинусоидальности в питающей сети.

5. Предлагаемый способ расчета несинусоидальных установившихся режимов в сетях с полупроводниковыми преобразователями позволяет учесть максимальное количество факторов существующей сети и является достаточно гибким с точки зрения разнообразия исходных данных. ●

Литература

1. Полищук А., Туркин А. Концепция применения светильников со светодиодами в целях реализации программы энергосберегающего освещения // Компоненты и технологии. 2007. № 11.
2. Гужов С., Полищук А., Туркин А. Концепция применения светильников со светодиодами совместно с традиционными источниками света // СТА. 2008. № 1.
3. www.w.ledcity.org
4. Хайнрих М. Возможности и тенденции экономии электроэнергии при применении электронных пускорегулирующих аппаратов и светорегулирующей системы LUXCONTROL в осветительных установках // Светотехника. 2007. № 1.
5. ПУЭ, изд. 7-е, перераб. и дополн. Утв. 06.10.1999, действ. с 01.07.2000.
6. Сергеев Б. С., Рошман Э. М., Савельев Е. О. Управление светодиодными матрицами с помощью реактивных элементов // Электричество. 2004. № 9.
7. Титова Г. Р., Гужов С. В. Светодиодные технологии в уличном освещении городов //

Пленарные доклады, материалы юбилейной научно-технической конференции. Казань: КГЭУ, 2007.

8. Качество электроэнергетики в электрических сетях и способы его обеспечения. Уч. пос. по курсу «Передача и распределение электрической энергии» / Под ред. В. Г. Федченко. М.: Издательство МЭИ, 1992.
9. Дьяков А. Ф., Максимов Б. К., Борисов Р. К., Кужекин И. П., Жуков А. В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. М.: Энергоатомиздат, 2003.
10. Жежеленко И. В., Шиманский О. Б. Электромагнитные помехи в системах электропитания промышленных предприятий. Киев: Высшая школа, 1986.
11. Родыгин А. В., Черепанов В. В. Применение моделей переменного тока для расчета несинусоидальности токов и напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий. — В кн.: Новая техника в электроснабжении и электрооборудовании промышленных предприятий. М.: МДНТП, 1975.
12. Черепанов В. В. Расчеты несинусоидальных и несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий: Уч. пос. // Горький: издательство. ГТУ, 1989.
13. Парфентьев Д. В., Иванов Б. А. Основные аспекты внедрения частотно-регулируемого электропривода на насосные станции водоснабжения // Главный энергетик. 2007. № 12. ЭАТП УГУ Ухта, ООО «Газпром-трансгаз Ухта».